



**Júlio Filipe Balagões Pinto**

Licenciatura em Ciências da Engenharia Mecânica

## **Optimização de sistemas de mistura e alimentação em unidades produtoras de plástico**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor João Mário Burgete Botelho  
Cardoso, Prof. Auxiliar, FCT-UNL  
Co-orientador: Engenheiro Tiago Pinheiro Duarte  
Filipe, Prof. Convidado, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira

Arguente: Engenheira Paula Sofia da Cruz Henriques Alves

Vogais: Prof. Doutor João Mário Burgete Botelho Cardoso  
Engenheiro Tiago Pinheiro Duarte Filipe



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro, 2013**



## **Optimização de sistemas de mistura e alimentação em unidades produtoras de plástico**

Nota: Esta dissertação não foi escrita ao abrigo do novo acordo ortográfico de 1990.

*Copyright @* Júlio Filipe Balagões Pinto, FCT /UNL, UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.





## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer à minha família, em particular aos meus pais, tias, tio e irmã por me terem permitido ter chegado onde cheguei a nível escolar e pessoal, aos quais dedico este trabalho.

Ao Eng.º Tiago Duarte Filipe agradeço todo empenho que se traduziu num eixo decisivo para o resultado deste trabalho. Agradeço-lhe também, pela inteligência, paciência, disponibilidade, confiança, apoio e simpatia com que me guiou nesta última etapa, imprescindíveis à realização desta dissertação.

A todos os meus colegas de faculdade com quem convivi, cresci e trabalhei e que ao longo destes anos têm sido um apoio fundamental, ajudando a passar o dia a dia e a chegar onde estou hoje. Um Obrigado a todos eles e em particular a Duarte Silva, Marco Correia, Jorge Martins, David Nunes e Rodrigo Roçadas.

A todos os meus amigos que me acompanham ao longo de vários anos sempre presentes nos bons e maus momentos. Obrigado a todos eles, Luís Fonseca, Ricardo Monteiro e João Monteiro e grupo Zebrinha.

Agradeço também a todos os amigos que fiz e me ajudaram na minha estadia na Suécia, que sem eles, teria sido complicado. Obrigado a todos eles, Família Zacarias, Johan Zaya, Sergej Abyzov, Hamed Shakib, Henrique Cunha, Daniel Lohse, Pedro Ramos, Sofia Rocha e Inês Pestana.

Não posso deixar de agradecer aos meus fieis amigos e animais de estimação, que me acompanharam e recebiam sempre com enorme alegria. Rudy e Rucky, muito obrigado.

Desejo também agradecer às seguintes instituições e empresas:

Ao Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da Universidade Nova de Lisboa (UNL), Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT), e em particular, à Área Científica de Tecnologia Mecânica.

ISOLAGO – Indústria de plásticos que foi a unidade produtiva em estudo e em especial ao Sr. António Vieira pela disponibilidade e amabilidade com que me facultou várias informações.



## **RESUMO**

A indústria dos Plásticos tem em Portugal uma importância estratégica para a economia, com as mais diversas aplicações e mercados. Em termos industriais, os principais processos produtivos são baseados na extrusão, onde se identificam dificuldades no fornecimento, manuseamento e mistura dos diferentes tipos de materiais e ingredientes do processo produtivo. Consequentemente, a produtividade na indústria está associada à capacidade produtiva e à estabilidade do processo.

O objectivo deste trabalho é identificar o processo de extrusão e as suas etapas, tais como, alimentação e mistura de matérias primas e avaliar do seu impacto no produção, de modo a melhorar e otimizar o processo produtivo, melhorando assim a eficiência e a qualidade do produto.

Neste estudo será analisado um caso real de uma empresa de extrusão de concentrados e compostos plásticos tentando melhorar o seu actual processo. São consideradas e apresentadas várias hipóteses de propostas de melhoria, tanto no que diz respeito à etapa de mistura como de alimentação, que tiveram como critério a sua eficiência, tempo de execução/ciclo e custo inicial de aquisição.

São também apresentadas propostas para sistemas de limpeza, dado que não havia existência de nenhum na unidade fabril. Estas propostas têm como finalidade a diminuição do tempo de limpeza e consequente tempo de não produção.

## **Palavras Chave**

Masterbatch, Resinas Plástica, Extrusão, Mistura, Produção, Sistema de alimentação



## **ABSTRACT**

The Portuguese Plastics industry has a strategic importance to the economy, with many different applications and markets. The main production processes are based on extrusion, in which difficulties in the feeding, mixing and handling of different types of materials and ingredients in the production process are identified. The productivity in industry is associated with the production capacity and the stability of the process.

The aim of this study is to identify and assess the various processes of feeding and mixing of raw materials and their impact on the extrusion process in order to optimize production, thus improving the efficiency and product quality.

This study will analyse a real case in a plastic masterbatch and compounding company. Several options for the proposed improvements are considered and presented, both with regard to the mixing and feeding steps, which had as criteria the efficiency, runtime/cycle time and initial purchase cost.

Suggestions are made for cleaning systems, which weren't contemplated in the project, aiming to reduce the cleaning time and consequently non-production time.

## **Key Words**

Masterbatch, Plastic Resins, Extrusion, Blending, Compounding, Production, Feeding systems



# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	iii
RESUMO.....	v
Palavras Chave .....	v
ABSTRACT .....	vii
Key Words .....	vii
NOMENCLATURA.....	xv
SIGLAS .....	xvii
GLOSSÁRIO.....	xix
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Introdução .....	1
1.2 Enquadramento e Motivação .....	1
1.3 Objectivos .....	2
1.4 Estrutura da Dissertação .....	2
2 - REVISÃO DO ESTADO DA ARTE .....	3
2.1 – Introdução .....	3
2.2 A Extrusão .....	4
2.2.1 Descrição do Processo .....	5
2.3 A Extrusora .....	6
2.3.1 Fuso/Sem-fim .....	7
2.3.2 <i>Hopper</i> /Tremonha/Funil/Alimentador/Reservatório de alimentação .....	8
2.4 Descrição de Processos Produtivos Associados à Extrusão .....	13
2.4.1 Processo de Pré-Mistura .....	13
2.4.2 Alimentação Lateral.....	14
2.4.3 Alimentação Automática.....	15
2.5 Processo de Pré-Mistura .....	17
2.5.1 <i>Batch</i> ou <i>off-line mixer</i> .....	18
2.5.2 Contínuo ou <i>In-line mixer</i> .....	18
2.6 Equipamentos de mistura.....	19
2.7 Equipamentos de manuseamento, alimentação e de transporte dos materiais.....	23
2.7.1 Manuseamento e Alimentação .....	23
2.7.2 Manuseamento e Transporte.....	25
2.8 Matéria Prima .....	25
2.8.1 Os Termoplásticos .....	28
2.8.2 Os Aditivos, ajudantes de processo .....	29

2.9	Instabilidade de escoamento associado à tremonha ( <i>hopper</i> ).....	30
2.10	Mudança de ordem, limpeza e manutenção das linhas .....	35
3	DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO E/OU IDENTIFICAÇÃO DE PROBLEMAS .....	37
3.1	Introdução .....	37
3.2	Processo Produtivo .....	37
3.2.1	Mistura e manuseamento de materiais/ingredientes .....	39
3.2.2	Alimentação.....	41
3.2.3	Transporte dos materiais .....	44
3.2.4	Mudança de ordem e limpeza da linha .....	45
3.3	Origem e explicação dos problemas a solucionar.....	46
4	SOLUÇÕES E PROPOSTAS .....	49
4.1	Introdução .....	49
4.2	Propostas com vista a melhoramentos na mistura e alimentação. ....	49
4.2.1	Dimensionamento de nova tremonha .....	49
4.2.2	Transformação em <i>ribbon blender</i> vertical.....	50
4.2.3	Transformação em misturador/alimentador.....	51
4.3	Proposta de novos sistemas de mistura e alimentação da extrusora .....	53
4.4	Novo Sistema de Limpeza .....	54
4.4.1	Aspersor extensível.....	54
4.4.2	Aspersor fixo rotativo .....	55
4.4.3	Escovilhão/Escova .....	56
5	CONCLUSÕES.....	57
5.1	Introdução .....	57
5.2	Conclusões .....	57
5.3	Propostas para desenvolvimentos futuros.....	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	I



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 – Extrusora .....	6
Figura 2-2 – Diferentes portas de alimentação (Adaptado [7]) .....	7
Figura 2-3 – <i>Three-zone screw</i> , com as respectivas zonas identificadas [12]. .....	8
Figura 2-4 – Outras configurações de sem-fins na ajuda da mistura: a) pinos/picos entre roscas ; b) roscas com inclinação contrária à restante do sem-fim, com o intuito de aumentar a pressão de extrusão como requer a produção de espumas plásticas [12]. .....	8
Figura 2-5 - Má e boa configuração do reservatório de alimentação (Adaptado [7]).....	9
Figura 2-6 – Representação esquemática de escoamentos em reservatórios de alimentação (a) “massa”, (b) <i>bridging /arching</i> , (c) “funil”, (d) tubo [13]. .....	10
Figura 2-7 - Representação das regiões, obtidas por técnicas de radiografia. A - “zona de ruptura”, B - comportamento de corpo rígido, C - zona de escoamento livre, D - “ <i>plug-flow zone</i> ”[13]. .....	10
Figura 2-8 – Reservatório vertical de forma cilíndrica [13]. .....	11
Figura 2-9 – Configuração de um <i>hopper</i> cónico com secção cónica e cilíndrica [7]. .....	12
Figura 2-10 – Diagrama de fluxo de operações. Alimentação manual.....	14
Figura 2-11 – Diagrama de fluxo de operações. Alimentação semi-automática com alimentação lateral. ....	15
Figura 2-12 – Diagrama de fluxo de operações. Alimentação automática. ....	16
Figura 2-13 – Diagrama de fluxo de operações. Alimentação automática. ....	17
Figura 2-14 – Gráfico de variação do produto final. ....	17
Figura 2-15 – Processo de extrusão <i>In-line</i> [12]. .....	19
Figura 2-16 - <i>Double V-cone</i> [12]. .....	20
Figura 2-17 - <i>Ribbon blender</i> [12]. .....	21
Figura 2-18 – Vertical <i>blender</i> . Em a), b) e c) as setas a vermelho representam o movimento das partículas. Em a) e c) as mesma setas representam o movimento do sem-fim [19]...21	
Figura 2-19 – Exemplo de <i>fluidized bed mixer</i> e respectiva legendas dos componentes [20].22	
Figura 2-20 – Balança/Alimentador gravimétrico ( <i>Gravimetric feeder</i> ) [21]. ....	24
Figura 2-21 – Balança/alimentador volumétrico ( <i>Volumetric feeder</i> ) [23]. ....	24
Figura 2-22 – Alimentador de vácuo [12].....	25
Figura 2-23 – Diagrama com matéria Prima, termoplásticos e aditivos utilizados na indústria dos plásticos.....	26
Figura 2-24 - Tipos de resinas plásticas – a) Pó, b) escamas, c) granulado.....	26
Figura 2-25 – Linhas para valores de <i>ffc</i> constantes [27]. ....	28

Figura 2–26 – Ângulo de repouso $\alpha$ , de uma pilha de pó a) num plano horizontal, b) num recipiente [28].	28
Figura 2–27 – Exemplos de escoamento expandido [32].	31
Figura 2–28 – Diferenciação entre <i>interlocking</i> e <i>cohesive arching</i> [33].	32
Figura 2–29 – <i>Rathole</i> [33].	33
Figura 2–30 – Exemplos de <i>funel flow</i> [32].	33
Figura 2–31 – Exemplo de <i>flooding/flushing</i> [28].	34
Figura 2–32 – Exemplo de formação de camadas. <i>Particle segregation</i> [32].	34
Figura 3–1 – Produto semi-acabado proveniente da extrusora.	38
Figura 3–2 – Parte final da produção, realizando o enchimento do <i>bigbag</i> visível à direita	38
Figura 3–3 – Extrusora e sistema de alimentação existente na ISOLAGO.	39
Figura 3–4 – Misturador <i>high intensity mixer</i> e a preparação dos “one-pack”	40
Figura 3–5 – Preparação da mistura manual utilizando uma balança.	40
Figura 3–6 – Sistema gravimétrico doseador.	41
Figura 3–7 – Sistema de Alimentação	42
Figura 3–8 – Carrinho e tremonha de secção quadrada.	43
Figura 3–9 – Dispositivo artesanal	43
Figura 3–10 – Alimentador da extrusora composto por recipiente, balança e dispositivo artesanal.	44
Figura 3–11 – Carrinho de transporte e tremonha ( <i>hopper</i> )	45
Figura 3–12 – Lâminas rotativas que foram incorporadas no <i>hopper</i> que está acoplado ao carrinho	47
Figura 4–1 – Gráfico para dimensionamento de <i>hoppers</i> cónicos e respectivas regiões do tipo de escoamento (com base no estudo efectuado por <i>Jenike</i> [25]) (Adaptado [32]).	50
Figura 4–2 – Configuração de como ficará transformação.	51
Figura 4–3 – Tampa com sem-fim, motor e olhais.	51
Figura 4–4 – Transformação em misturador/alimentador.	52
Figura 4–5 – Caixa com as lâminas de mistura.	52
Figura 4–6 – Diagrama de fluxo de operações para novo sistema de operações. Proposta 1.	53
Figura 4–7 – Diagrama de fluxo de operações para novo sistema de alimentação. Proposta 2.	54
Figura 4–8 Aspersor extensível.	55
Figura 4–9 Aspersor fixo rotativo.	55
Figura 4–10 – Em a) Escovilhão e b) Escova.	56

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 – Tipo de processos, descrição e mercados finais. ....	4
Tabela 2-2 – Vantagens e desvantagens do processo de extrusão face a outros processos (Adaptado [3]). ....	5
Tabela 2-3 – Comparação entre os processos Contínuos e <i>Batch</i> . ....	19
Tabela 2-4 – Comparação de diferentes misturadores [8]. ....	22
Tabela 2-5 – Classificação das partículas sólidas (Adaptado [26]). ....	27
Tabela 2-6 – Vantagens e Desvantagens na utilização de plásticos (Adaptado [29]). ....	29
Tabela 2-7 – Aditivos, efeitos e percentagem de utilização. ....	30
Tabela 2-8 – Vantagens e Desvantagens de <i>Mass</i> e <i>Funnel flow</i> (Adaptado [28]). ....	31
Tabela 2-9 – Tempos de mudança de ordem com 2 operadores. ....	35



## NOMENCLATURA

$L$  – Comprimento do fuso/sem-fim

$D$  – Diâmetro do fuso/sem-fim (§2.3.1), Diâmetro do cilindro (§2.3.2)

$P$  – Pressão estática

$H, h$  – Altura

$g$  – Aceleração da gravidade

$\rho$  – Densidade do líquido

$A$  – Área de secção

$\rho_b$  – Densidade do *bulk*

$dh$  – Altura do elemento

$dp$  – Pressão no elemento

$c_w$  – Coeficiente de coesão na parede

$f'_w$  – Coeficiente de atrito

$K$  – Rácio de tensão de compressão na direcção horizontal com tensão de compressão na direcção vertical

$C$  – Perímetro da área de secção molhada

$D$  – Diâmetro do cilindro

$c$  – coeficiente para *conical hoppers*

$\theta_c$  – Ângulo do cone do *hopper*

$\phi_w$  – *Wall friction angle*



## **SIGLAS**

<i>ABS</i>	Acrilonitrila butadieno estireno
<i>PE</i>	Polietileno
<i>PP</i>	Polipropileno
<i>PS</i>	Poliestireno
<i>PVC</i>	Policloreto de vinilo
<i>DEM</i>	Método de elementos discretos





## GLOSSÁRIO

***Bulk*** – Pode referir-se a uma grande quantidade de material (pó, granulado) ou pode referir-se apenas a material em pó.

***Blend*** – Mistura de dois ou mais componentes sem ligação das cadeias poliméricas e com diferentes características.

***Compounding*** – Operação de distribuir, dispersar e derreter diversos ingredientes em um produto uniforme.

***Free flow particules*** – Materiais que não se aderem/colam uns aos outros

***Masterbatch*** – Processo mestre na mistura de pigmentos.

***Make-in-order*** – Produção é regulada conforme as encomendas recebidas

***Mixing*** – Operação de combinação de vários ingredientes ou porções do mesmo ingredientes em uma mistura uniforme.

***Premix*** – Refere-se normalmente a uma substância ou objecto que é misturado em uma fase preliminar do processo de produção.

***Regrind*** – Adição de material previamente processado a material virgem.



# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 Introdução**

A importância da Indústria dos Plásticos na vida quotidiana e a competitividade no sector requerem uma forte aposta na performance operacional e uma elevada produtividade do sector produtivo.

A dissertação revela-se actual e aplicável a diferentes sectores produtivos que utilizem processos similares de extrusão e mistura de componentes, como os utilizados na produção de produtos plásticos.

## **1.2 Enquadramento e Motivação**

A motivação para a presente dissertação surge com o problema posto por uma empresa industrial (uma multinacional da indústria do plástico) que pretende melhorar e otimizar o processo de extrusão de uma das suas linhas de produção, com a possibilidade de melhoria de outros processos envolventes da extrusão, tais como, mistura e transporte de materiais, alimentação da extrusora e limpeza da linha. A mistura de materiais é uns dos aspectos mais importantes pois, sem esta, não se consegue a homogeneização necessária para um produto de qualidade. Além disso, apresenta-se como uma das funções consumidoras de mão-de-obra. Um outro aspecto também importante é a alimentação, uma vez que este processo tem um factor determinante no funcionamento da extrusora, qualidade do produto final e de todo o processo de extrusão. Por materiais, entende-se os polímeros e os aditivos.

O procedimento de mudança de ordem de produção também é um aspecto importante, de forma a evitar contaminações e melhorar a produtividade.

Serve também de motivação à presente dissertação, o facto de este tipo de trabalhos estar muito próximo da actividade do mundo laboral, possibilitando assim um maior conhecimento e adaptação a essa realidade, podendo inclusive ser aplicado numa indústria.

O processo de extrusão é o processo mais utilizado na indústria de processamento de plástico (ou resinas plásticas) mais do que qualquer outro tipo de processo conhecido.

Este trabalho tem a colaboração da empresa ISOLAGO, uma empresa produtora e exportadora de compostos e concentrados plásticos instalada na região de Lisboa.

### **1.3 Objectivos**

Numa primeira fase deste projecto de dissertação é efectuada a avaliação da estrutura fabril existente e do processo actual de produção. Da avaliação resulta a detecção de problemas de funcionamento ou processo e pontos de melhoria. Chega-se então ao objectivo desta dissertação, que consiste numa proposta de optimização do processo actual de produção que abrange matérias como tipo de mistura de ingredientes, alimentação da extrusora, redesenho/modificação de componentes e limpeza da linha de produção e respectivos componentes, com base em estudos de investigação preliminares. Todo o estudo assenta na aplicação da metodologia descrita ao processo de produção de concentrado de cor da Isolago.

### **1.4 Estrutura da Dissertação**

A presente dissertação está dividida em 5 capítulos, dos quais o presente constitui a introdução, o enquadramento e motivação, a definição dos objectivos e a descrição da sua própria estrutura.

O capítulo 2 é referente ao estado da arte, onde é apresentado o estudo bibliográfico e a explicação da ocorrência de vários fenómenos e contém a base científica.

No capítulo 3, é apresentado o processo produtivo observado e estudado de forma a identificar e analisar possíveis falhas de processo.

No capítulo 4, aplica-se o estudo efectuado e desenvolvem-se várias hipóteses de propostas de melhoramento e optimização dos vários processos e da linha de alimentação.

Finalmente, no capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões e propostas para desenvolvimento de trabalho futuro.

## **2 - REVISÃO DO ESTADO DA ARTE**

### **2.1 – Introdução**

Neste capítulo é exibida a pesquisa bibliográfica realizada para a presente dissertação. O propósito é enquadrar os desenvolvimentos realizados nos capítulos seguintes, na área da extrusão de plásticos. Aborda-se então o estado da arte das principais matérias envolvidas na dissertação, ou seja, o processo de extrusão com maior destaque para os processos de mistura, alimentação, limpeza e manuseamento e transporte de materiais.

Seria difícil de imaginar o mundo moderno sem plásticos. Desde a descoberta do plástico, que este tem vindo a aumentar e reforçar a sua presença em inúmeras aplicações no quotidiano, desde produtos domésticos até produtos científica e tecnologicamente sofisticados. Deve-se isso ao facto de o plástico, associado com outros materiais, aditivos e outros plásticos, conseguir atingir propriedades mecânicas, térmicas e químicas semelhantes ao vidro, madeira e metais. Uma vantagem que o plástico tem a seu favor face a outros materiais, é poder ser reciclado e, consequentemente reprocessado. Desta forma, é um material mais amigo do ambiente, apesar de na generalidade das situações ser proveniente do petróleo, um recurso natural bastante poluente.

Devido à maior utilização de plásticos, a indústria viu também serem melhoradas as suas unidades produtivas, tanto a nível tecnológico como científico, otimizando processos produtivos como, por exemplo, linhas de alimentação, misturas, tempo de ciclos, máquinas produtivas, etc., com a finalidade de aumentar a produtividade, diminuir custos, aumentando desta forma a sua eficiência.

A Tabela 2–1 faz um breve descrição dos processos e mercados finais de alguns tipos de processo de extrusão mais conhecidos.

**Tabela 2–1 – Tipo de processos, descrição e mercados finais.**

<b>Tipo de Processo</b>	<b>Descrição de processo</b>	<b>Descrição dos mercados finais</b>
<b>Injecção</b>	Processo de produção de peças plásticas através da utilização de molde metálico (fechado) e máquina de Injecção	Embalagens alimentares, tampas, componentes automóveis, caixas e contentores, acessórios eléctricos
<b>Extrusão Sopro</b>	Processo de produção de peças plásticas através da insuflação de uma manga plástica num molde metálico (aberto)	Garrafas, embalagens de líquidos
<b>Extrusão filme</b>	Processo de produção de filme plástico através da insuflação de um balão de parede fina	Sacos do lixo, sacos de alça de supermercados, filme retráctil, filme agrícola, filme de estufas
<b>Extrusão perfis</b>	Processo de produção de peças tubulares ou perfiladas, por extrusão em matriz	Tubos rígidos, tubos flexíveis, palhinhas, perfis de janela, perfis para mobiliário, isolamento de cabos eléctricos
<b>Extrusão de lâmina</b>	Processo de produção de lâmina plástica por processo de extrusão e de calandragem por rolo	Tabuleiros, embalagens alimentares, painéis isolantes
<b>Produção de cordas e ráfia</b>	Processo de filamentos plásticos, seguidos de processos de tecelagem ou encordoamento	Cordas, cabos sintéticos, sacos de ráfias e mantas agrícolas

## **2.2 A Extrusão**

A extrusão de plásticos é considerada um método primário do processo produtivo e um dos mais antigos. Neste método é conferido ao material, após uma completa fusão, uma nova forma, obtendo-se um novo produto. A gama de produtos vai desde perfis simples, como tubos, varões, placas, filme e folhas até perfis mais complexos/complicados [1], [2].

A Tabela 2–2 enuncia algumas vantagens e desvantagens do processo de extrusão relativamente a outros processos de produção de plástico como, por exemplo, o processo de injecção.

**Tabela 2–2 – Vantagens e desvantagens do processo de extrusão face a outros processos (Adaptado [3]).**

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Contínuo	Limitação face a peças complexas
Elevados volumes de produção	Apenas formas transversais uniformes
Baixo custo por quilo	
Fusão eficiente	
Vários tipos de materiais	
Boa mistura ( <i>compounding</i> )	

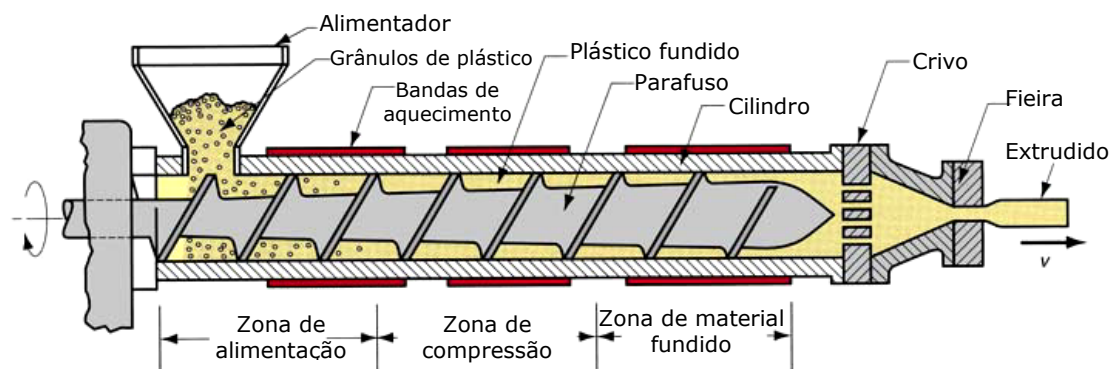
### **2.2.1 Descrição do Processo**

O processo de extrusão é um processo produtivo contínuo, que transforma as resinas plásticas em produtos acabados e/ou semiacabados. Serve também para produzir misturas de materiais plásticos de formas primárias, como granulados. Este tipo de processo pode também ser utilizado para reprocessar, recuperar e/ou reciclar materiais previamente processados, uma vez que estes materiais não podem ser devolvidos ao ambiente através da degradação biológica, hidrólise ou decomposição. Nesta categoria encontram-se os desperdícios de processo (produção de filme), lixo ou produtos em fim de vida (borracha) e materiais provenientes de processamento inadequado (contaminação) [1], [2], [4], [5].

Enumeram-se alguns passos de como ocorre o processo de extrusão, para uma melhor compreensão [6]:

- I. O material entra na extrusora pela boca/garganta/porta de alimentação, proveniente do alimentador ou reservatório de mistura (alimentador, como referenciado na Figura 2–1);
- II. Dentro do cilindro, por rotação do parafuso/sem-fim, o material é encaminhado até à matriz ou ao fim da extrusora;
- III. Durante o percurso, desde que entra até que sai do cilindro, o plástico sofre forças de fricção, por parte do parafuso/sem-fim e do contacto com as paredes do cilindro, originando aquecimento e o plástico funde. Devido a esta alteração de estado, ocorre então a mistura e fusão dos vários ingredientes. O sistema de controlo da temperatura do cilindro tem como principal função, manter o plástico no estado pastoso, servindo também para evitar perdas de calor com o ambiente e consequente variação de temperaturas;
- IV. O plástico derretido é então expelido, obtendo-se um novo produto.

A Figura 2-1 ilustra uma representação esquemática de uma extrusora e seus componentes com a respectiva legenda.



**Figura 2-1 – Extrusora**

## 2.3 A Extrusora

Para esta dissertação, alguns aspectos importantes da extrusora têm a ver com os seus componentes, pois estes têm de apresentar boas configurações, caso contrário, originam problemas de funcionamento, causando uma paragem no processo produtivo.

Na zona de alimentação, o material deve escoar para o cilindro e para o sem-fim com o mínimo de resistência possível. Não se verificando essas condições, o plástico pode atingir temperaturas indesejáveis, impedindo assim o seu normal escoamento por ficar colado às paredes do reservatório e do sem-fim da extrusora. Para resolver problemas de escoamento na zona de alimentação, é adicionado um dispositivo que faz a refrigeração do plástico. Outra resolução é também ter uma boa configuração da zona de alimentação da extrusora como ilustrado na Figura 2-2. Aqui, a figura a) representa a forma da alimentação, não forçada, mais utilizada. A figura b) mostra o sistema de alimentação utilizado quando são introduzidos componentes pastosos. O inconveniente desta configuração é que, no caso de o material apresentar alta rigidez, serão geradas forças radiais que irão causar a deflexão do sem-fim encostando-o ao cilindro, danificando o sistema. A melhor geometria é a apresentada na figura c), onde o rebaixamento lateral aumenta a capacidade de introdução de material no sistema [7].



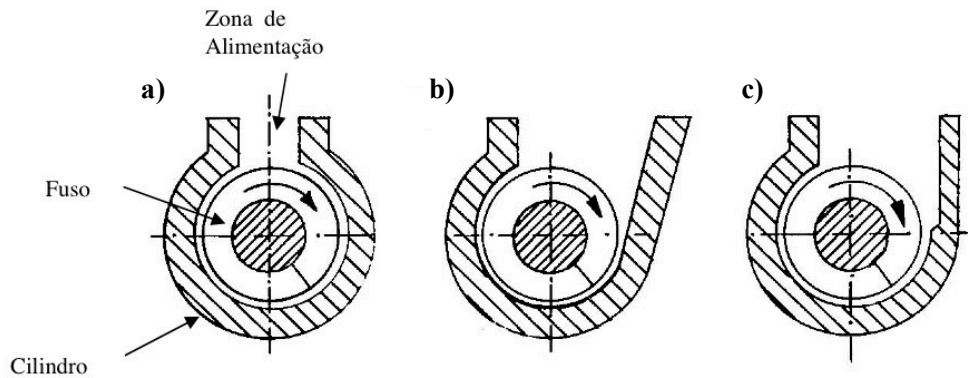


Figura 2-2 – Diferentes portas de alimentação (Adaptado [7])

Na maioria dos processos, a extrusora é alimentada com polímero em grão e aditivos (pó, grãos, escamas, etc.), podendo ser chamada de extrusora de plastificação (*plasticating extruder*). Neste tipo de extrusoras, ocorre a transformação de partículas sólidas em líquido viscoso, por acção de forças de atrito, com a ajuda do sem-fim e temperatura no cilindro. [8].

### 2.3.1 Fuso/Sem-fim

O fuso ou sem-fim, também chamado de o coração da extrusora, é o único componente que exerce trabalho. A performance da extrusora está directamente associada com a configuração do sem-fim, daí, este ter vindo a sofrer evoluções ao longo dos anos, pois permitiu ao produtores de plástico e borracha um aumento na produtividade e qualidade dos seus produtos. O fuso tem funções de alimentação, transporte, fusão e homogeneização, da forma mais eficiente. O tipo de sem-fim mais utilizado, uma vez que é aquele que consegue processar a maioria dos termoplásticos, é o sem-fim de três zonas (*three-zone screw*), alimentação, compressão/transição e material fundido [1], [6], [9], [10], [11].

- Zona de Alimentação (*feed*): Zona onde o material é aspirado e encaminhado ao longo do sem-fim enquanto começa a ser aquecido. Zona de rosca com passo constante.
- Zona de Compressão ou Transição (*compression* ou *transition*): Zona onde o material é comprimido e fundido. Nesta zona a rosca pode ter várias configurações, vários passos e o diâmetro do sem-fim é variável.
- Zona de material fundido (*metering*): Zona onde o material é homogeneizado com aumento de temperatura. Zona onde é confinada a qualidade do produto. Nesta zona o fuso pode ser longo ou curto, estreito ou grosso, mas a rosca é de passo constante.

O fuso e respectivas zonas estão ilustradas e identificadas na Figura 2–3.

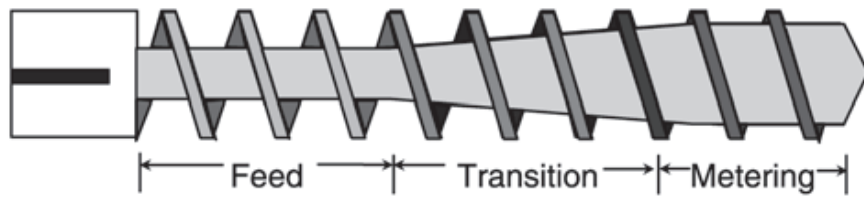


Figura 2–3 – *Three-zone screw*, com as respectivas zonas identificadas [12].

Uma característica importante do fuso é o rácio, que determina a eficiência da extrusora. Pode ser calculado através de  $L/D$ , onde  $L$  é comprimento e  $D$  o diâmetro exterior do sem-fim [1]. Para extrusoras de produtos alimentares e extrusoras com capacidade de fundir material (processo simples) o rácio toma valores iguais ou inferiores a 20. Para extrusão de sopro, filme e injeção, o rácio aproxima-se dos 25. Para extrusoras de enorme output, o rácio é igual ou superior a 30 [11].

Existem várias configurações de sem-fins, com mais zonas para além das apresentadas, variando desde o comprimento, espessura, passo entre rosca, tipo de rosca, picos ou picos, etc., servindo para uma maior homogeneização do produto final. A configuração e comprimento do sem-fim depende do tipo de polímeros a serem processados, bem como da sua aplicação. Não sendo um assunto de estudo para esta dissertação, ir-se-á apenas apresentar alguns exemplos com diferentes configurações, como pode ser visto na Figura 2–4.

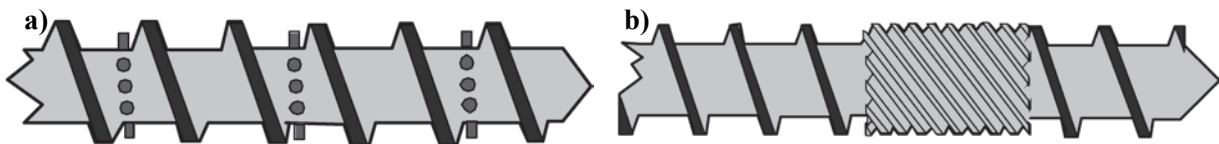


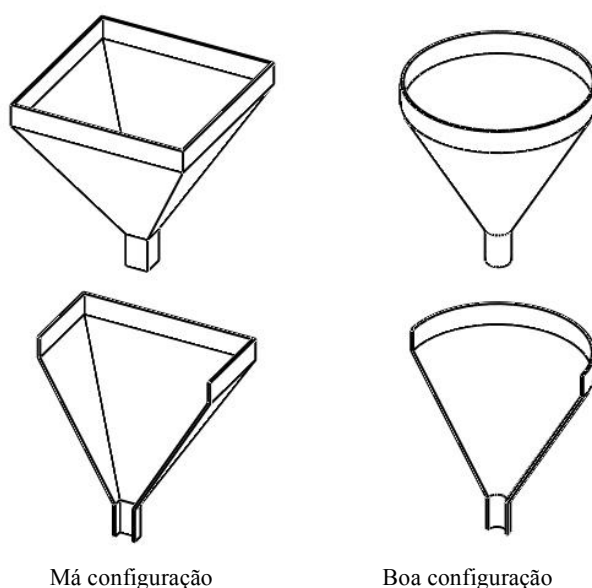
Figura 2–4 – Outras configurações de sem-fins na ajuda da mistura: a) pinos/picos entre rosca ; b) rosca com inclinação contrária à restante do sem-fim, com o intuito de aumentar a pressão de extrusão como requer a produção de espumas plásticas [12].

### 2.3.2 Tremonha/Alimentador/Reservatório de alimentação

Este componente/acessório, é um dos principais elementos em estudo e melhoria nesta dissertação. Tremonha, será o nome adoptado para identificar o componente ao longo desta dissertação embora em algumas imagens possa aparecer com o nome de *hopper*. A Figura 2–5 ilustra uma má e uma boa configuração da tremonha representada respectivamente pela secção rectangular e circular. Segundo *Rauwendaal* [7], reservatórios de secção rectangular, não proporcionam um bom escoamento, mas têm uma boa compressão na zona de alimentação, sendo mais indicados para as matérias primas em grão (*bulk/pellets*), desde que apresentem tamanho e forma idênticos, caso contrário, é preferível utilizar reservatórios circulares. Como exemplo de uma boa configuração, de forma a obter um escoamento

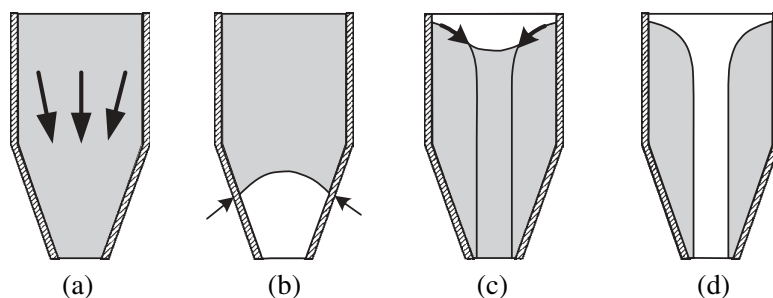
permanente, são os reservatórios de secção circular, conseguindo impor uma compressão gradual na zona de alimentação. Posteriormente, em §2.9, será explicado o que ocorre com diferentes valores de pressão e compressão na zona de alimentação.

O reservatório de alimentação tem como função controlar a alimentação da extrusora, independentemente da forma como a matéria prima chega (*pellets* – grão, pó, escamas, fibras, microesferas, etc.). Normalmente o material escoar apenas pela força da gravidade mas, devido a certas propriedades, surgem problemas de escoamento. Um exemplo é o material em pó (*bulk*), que apresenta pouca capacidade de escoamento, necessitando assim de mecanismos que o garantam [7]. Alguns mecanismos de ajuda ao escoamento serão apresentados posteriormente em §2.6.



**Figura 2-5 - Má e boa configuração do reservatório de alimentação (Adaptado [7]).**

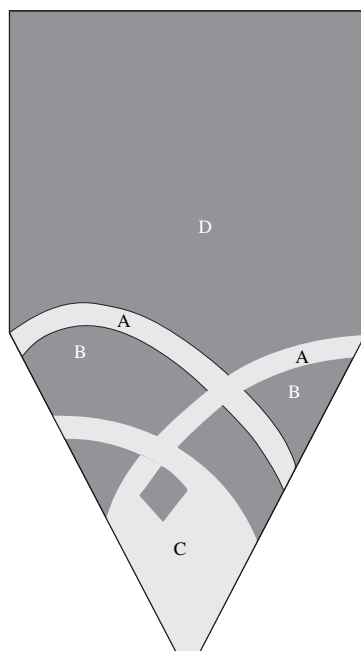
Não podendo ser o reservatório uma fonte de instabilidade e problemas no processo de extrusão, este não deve ser o limitador do rácio da produção. Nem sempre é fácil garantir um escoamento gravitacional (não forçado), ou seja, um escoamento que não requer qualquer tipo de dispositivo de ajuda. Existem 2 tipos de escoamento, o escoamento “massa” e o escoamento “funil”, como ilustrado na Figura 2-6. No escoamento “massa”, as partículas sólidas escoam para a saída, todas em conjunto, formando uma massa, enquanto que no escoamento “funil”, existem partículas que aderem à parede do reservatório, devido a forças criadas entre as partículas e o reservatório, criando um funil ou um tubo por onde escoam as restantes partículas[13].



**Figura 2-6 – Representação esquemática de escoamentos em reservatórios de alimentação (a) “massa”, (b) *bridging/arching*, (c) “funil”, (d) tubo [13].**

Lee *et al.*[14], estudaram o escoamento bidimensional dos reservatórios, utilizando técnicas de radiografia, para obter duas regiões, a de escoamento e a de porosidade. Do mesmo estudo, foi possível estimar o vector de velocidade local, devido ao rasto deixado pelas partículas, durante o escoamento. Com base neste estudo, pode-se observar, na Figura 2-7, o comportamento das partículas nas regiões obtidas por técnicas de radiografia, onde se identificam as seguintes regiões:

- A. “Zona de ruptura”
- B. Comportamento de corpo rígido
- C. Zona de escoamento livre
- D. “*Plug-flow zone*”



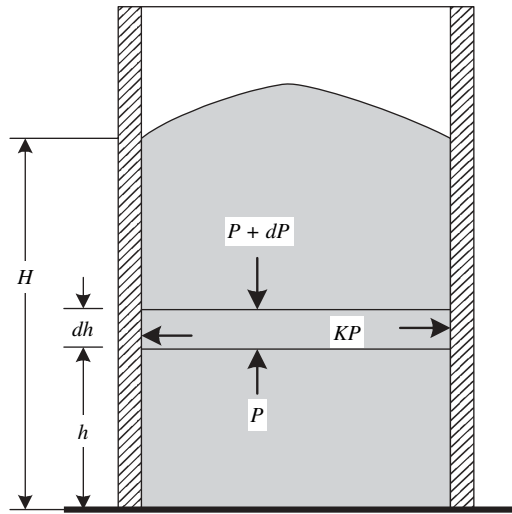
**Figura 2-7 - Representação das regiões, obtidas por técnicas de radiografia. A - “zona de ruptura”, B - comportamento de corpo rígido, C - zona de escoamento livre, D - “*plug-flow zone*”[13].**

Para melhor entendimento da ocorrência das instabilidades do escoamento, tem de se recorrer à distribuição de pressão no reservatório [12], como ilustra a Figura 2-8. Calcula-se a

pressão estática isotrópica,  $P$ , sobre uma coluna de líquido, recorrendo à altura da coluna acima do ponto de medida da pressão,  $h$ , e à densidade do líquido,  $\rho$ .

$$P = \rho g H \quad (2.1)$$

Contudo, esta formulação não é a mais adequada para se fazer a interpretação do problema, uma vez que, no caso em análise, o líquido é substituído por partículas sólidas. Assim, em 1895, *Janssen* [15] deduziu uma simples equação para a pressão em reservatórios, que ainda hoje é utilizada. Assumiu que a pressão vertical é constante no plano horizontal, a pressão vertical e horizontal são independentes da profundidade, a densidade é constante e as partículas estão na eminência de escorregar da parede do reservatório [13].



**Figura 2–8 – Diagrama de forças de um elemento num reservatório vertical de forma cilíndrica [13].**

Aplicando o balanço de forças a um elemento diferenciável, obtém-se o equilíbrio de forças

$$\underbrace{A\rho_b g dh}_{\text{[Peso do elemento]}} + \underbrace{(P + dP)A}_{\text{[Pressão]}} = \underbrace{(c_w + f'_w KP)C dh}_{\text{[Forças de atrito]}} + \underbrace{PA}_{\text{[Impulsão]}} \quad (2.2)$$

Onde  $A$  é a área de secção,  $\rho_b$  densidade do material,  $g$  gravidade,  $dh$  altura do elemento,  $c_w$  coeficiente de coesão na parede,  $f'_w$  coeficiente de atrito,  $K$  é o rácio da tensão de compressão na direcção horizontal com a tensão de compressão na direcção vertical e  $C$  é o perímetro da área de secção “molhada”.

Integrando o balanço de forças,

$$P = P_1 \left[ \frac{f'_w CK(h - h_1)}{A} \right] + \frac{A\rho_b g}{f'_w K} - c_w \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{f'_w CK(h - h_1)}{A} \right] \right\} \quad (2.3)$$

Aplicando condições de fronteira,  $P_1$  é a pressão à altura  $h_1$ . Para  $h=H$ ,  $P_1=0$  e  $c_w=0$  (não havendo adesão entre os sólidos e a parede) chega-se à fórmula simplificada de *Janssen*[15],

$$P = \frac{\rho_b g D}{4f'_w K} \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{4f'_w K (h-H)}{D} \right] \right\} \quad (2.4)$$

Fazendo

$$\lim_{H \rightarrow \infty} \frac{\rho_b g D}{4f'_w K} \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{4f'_w K (h-H)}{D} \right] \right\}$$

$$P_{\max} = \frac{(\rho_b g D)}{(4f'_w K)} \quad (2.5)$$

A pressão máxima é proporcional ao diâmetro e inversamente proporcional ao coeficiente de atrito da parede do reservatório. Assim, vê-se que grande parte do peso é suportado pelo atrito das paredes do reservatório [13].

Como a maior parte das tremonhas apresenta secções cónicas, *Walker* [16] derivou as equações para a obtenção de distribuição de pressões para essas secções. Apenas em condições de escoamento de massa, a distribuição de pressão é calculada através de [7]:

$$P = \left( \frac{h}{h_0} \right)^c P_0 + \frac{\rho_b g h}{c-1} \left[ 1 - \left( \frac{h}{h_0} \right)^{c-1} \right] \text{ para } c \neq 1 \quad (2.6)$$

ou

$$P = \frac{h}{h_0} P_0 + \rho_b g h \ln \left( \frac{h_0}{h} \right) \text{ para } c=1 \quad (2.7)$$

dependendo do valor de  $c$ , que representa o coeficiente para tremonhas cónicas. O estudo realizado por *Walters e Nedderman* [17] obteve a função de distribuição que estima o valor de  $c$ . Ainda nas equações (2.6) e (2.7),  $h_0$  é a altura vertical da secção cónica do *hopper* onde a pressão é  $P_0$ . Como pode ser visualizado na Figura 2-9.

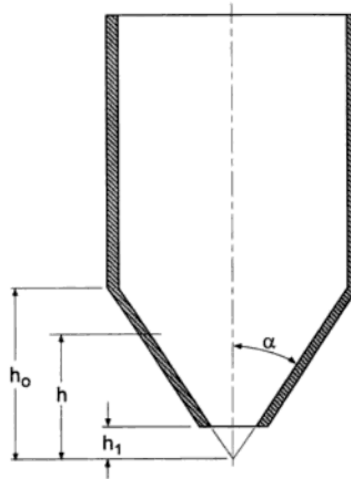


Figura 2-9 – Configuração de uma tremonha de secção cónica e cilíndrica [7].

Caso a pressão inicial na secção cónica seja zero, o valor de pressão máxima irá ocorrer ao longo da secção cónica. Em muitos casos, é acrescentada uma secção cilíndrica na parte superior da secção cónica, como exemplificado na Figura 2–9. Quando assim acontece, a pressão inicial na secção cónica é determinada pela pressão final na secção cilíndrica. Caso estas pressões não se encontrem aproximadamente nas secções referidas, ocorrem as zonas demonstradas na Figura 2–7.

## 2.4 Descrição de Processos Produtivos Associados à Extrusão

Os processos produtivos associados à extrusão são diversos. Podem ser catalogados, com base na forma de alimentação dos diferentes componentes, como a mistura dos diversos ingredientes (*mixing*), pesagem, pré-mistura (*pre-mix*), alimentação (*feeding*), extrusão e pós-extrusão. Existem variantes dos processos, tanto na ordem como na forma da ocorrência, embora nem todos pela sequência descrita, onde se exceptua a alimentação, a extrusão e a pós-extrusão. De referir também que podem existir vários pontos de mistura, pesagem e alimentação, consoante a receita/fórmula e o produto final a processar e produzir respectivamente.

Da análise e visita a várias indústrias e após pesquisa bibliográfica, os processos produtivos, bem como a montagem/disposição dos diversos componentes, podem ser esquematizados para uma melhor compreensão dos mesmos e observados nas Figura 2–10, Figura 2–11, Figura 2–12 e Figura 2–13. Aspectos comuns a todos eles é o facto de haver sempre dois tipos de ingredientes, pó e grão, que na maioria dos casos são tratados independentemente até serem misturados ou introduzidos na extrusora. Outro aspecto é que, após a actuação da extrusora, o novo produto continua para processos de pós-extrusão.

### 2.4.1 Processo de Pré-Mistura

A Figura 2–10 apresenta um diagrama onde é possível ver o fluxo das operações, tarefas e acções a realizar neste tipo de montagem/disposição fabril.

Geralmente é um processo inteiramente manual, onde a maior parte das etapas é realizada por operadores. Numa primeira fase, são escolhidos os materiais a serem processados. Estes são pesados numa balança e posteriormente seguem para uma misturadora, onde se dá uma pré-mistura (*pre-mix*). Nesta pré-mistura, o objectivo passa por homogeneizar os diferentes ingredientes em pó e/ou o grão, utilizando a formula a  $100\% (x\% \text{ grão} + y\% \text{ pó})$

**Nota:** Refere-se pó principalmente a aditivos de processo e grão aos polímeros termoplásticos. Ambos serão descritos posteriormente em §2.8. Instabilidades ocorridas na tremonha serão exibidas e descritas posteriormente em §2.9.

=100% da mistura), ou apenas homogeneizar os ingredientes em pó. Posteriormente, são descarregados e fornecidos à extrusora pela tremonha (*hopper*). Este, recebendo a mistura do *pre-mix*, pó e grão, alimenta a extrusora. Há também a possibilidade de a mistura de pó e grão ocorrer na tremonha e dentro da extrusora. Configuração com a desvantagem de ser tudo manual, desde a alimentação à limpeza. A limpeza, embora simples devido aos poucos componentes utilizados, consegue ser demorada quando se faz a mudança de ordem e pode originar contaminações. O facto de tudo ser pesado manualmente leva a que, este processo de produção exija uma elevada mão-de-obra, tendo um menor custo de investimento mas um elevado custo operacional.. Na tremonha, podem ocorrer as instabilidades apresentadas e explicadas posteriormente em §2.9. Contudo, é uma boa configuração para a produção de diferentes produtos. Esta opção apresenta-se como a de menor custo associado à sua montagem. A Figura 2–10 apresenta um diagrama onde é possível ver o fluxo das operações, tarefas e acções a realizar neste tipo de montagem/disposição fabril.

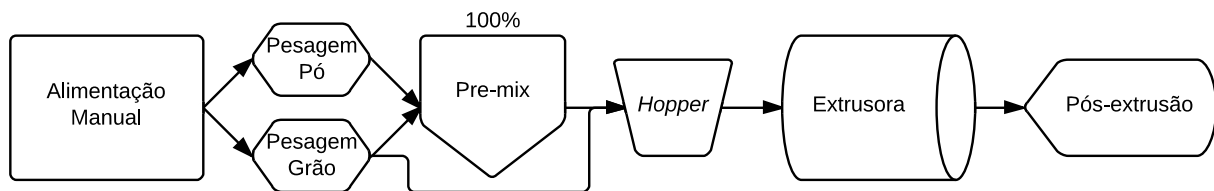


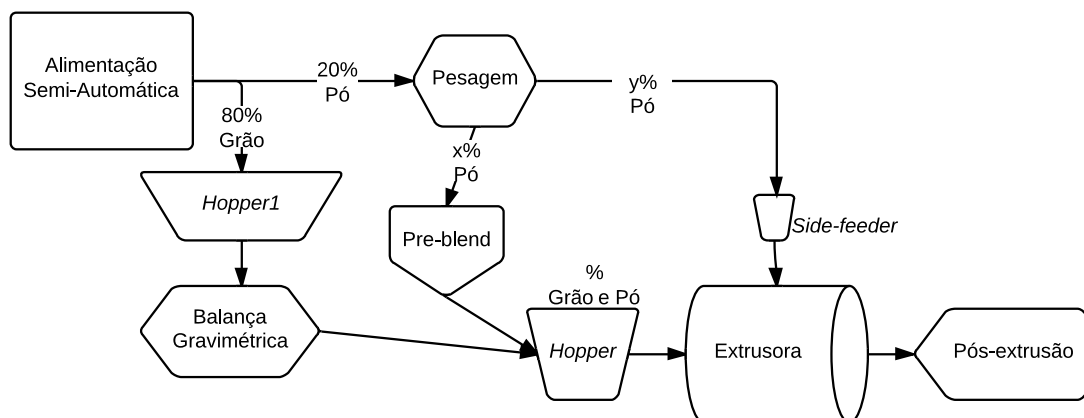
Figura 2–10 – Diagrama de fluxo de operações. Alimentação manual.

### 2.4.2 Alimentação Lateral

Esta alternativa apresenta etapas manuais e etapas automáticas, daí poder dizer-se que é de alimentação semi-automática. Neste tipo de configuração, desde o início que se sabe a formula a utilizar para o produto final, podendo dar como exemplo: 80% grão + 20% pó, alimentados de forma faseada. Assim sendo, estes dois materiais apenas irão ser juntos aquando da alimentação da extrusora. O grão irá passar por uma balança gravimétrica e, consequentemente, será doseado à medida das necessidades da extrusora. Por outro lado, o pó pode percorrer outros dois percursos. Num dos percursos,  $x\%$  é pesado, misturado e, só então, adicionado ao grão à entrada da extrusora. No outro percurso,  $y\%$  é adicionado a meio da extrusora, através de um alimentador lateral (*side-feeder*), para a obtenção do produto final. No segundo percurso, a alimentação a meio da extrusora (*side-feeder*) tem vários fins, mas um dos principais factores a ter em conta para sua utilização, é o das propriedades do material a ser adicionado que, adicionado no início, pode perder a capacidade e a finalidade a que se destinava, resultando um produto defeituoso ou contaminado. Há ainda a vantagem de ter a possibilidade de corrigir o produto final no momento, sem necessidade de haver paragens, limpezas e reprocessamentos. Com a utilização da balança/alimentador gravimétrico, consegue-se um melhor controlo das quantidades a alimentar, contudo, caso aconteça alguma



instabilidade (*arching, funnel flow*) na tremonha (*hopper1*) com consequente variação no escoamento, pode desregular a balança/alimentador gravimétrico. Com este tipo de configuração, consegue-se evitar a ocorrência de segregação. A limpeza é necessária, principalmente quando há mudança de ordem. Esta pode ser demorada devido aos diversos componentes utilizados. É necessário calibrar as balanças regularmente. Em relação à primeira opção, esta apresenta um custo de investimento mais elevado, contudo, relativamente baixo durante a produção de vários produtos que utilizem a mesma base de matérias primas. A Figura 2–11 apresenta um diagrama onde é possível ver o fluxo das operações, tarefas e acções a realizar neste tipo de montagem/configuração fabril.



**Figura 2–11 – Diagrama de fluxo de operações. Alimentação semi-automática com alimentação lateral.**

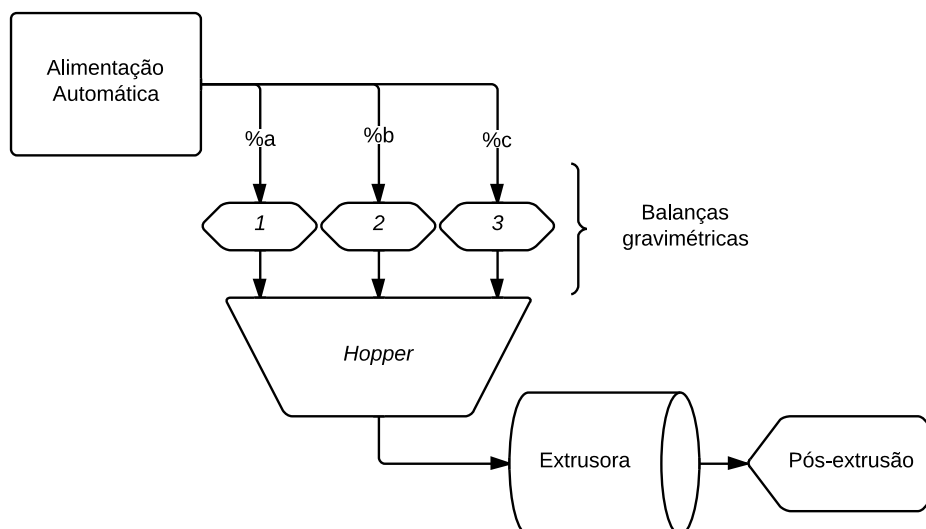
Esta configuração é a que melhor se aproxima da encontrada na ISOLAGO, contudo, não é realizado o processo de alimentação a meio da extrusora (*side-feeder*).

### 2.4.3 Alimentação Automática

Dentro da alimentação automática, existem várias configurações, das quais serão apresentadas duas configurações.

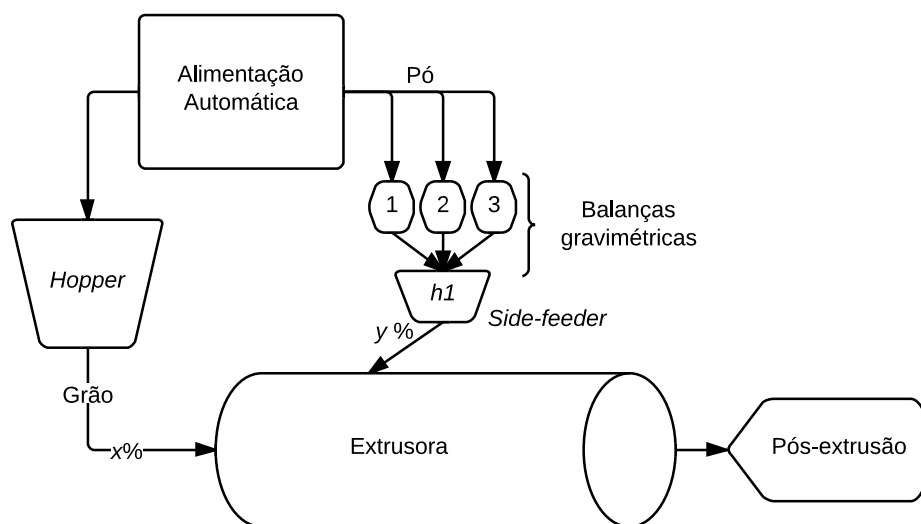
A primeira alternativa, apresenta processos completamente automáticos, podendo, em certos casos, ser o *stock* de materiais a utilizar no processo gerido apenas por um operador. Cada ingrediente tem o seu percurso e a sua balança/alimentador gravimétrico, podendo haver mais que as três apresentadas na Figura 2–12, consoante a receita. Estas estão programadas previamente, controlando assim as percentagens de cada ingrediente a serem adicionadas e processadas conforme a fórmula, para obtenção do produto final. Posteriormente, todos os ingredientes provenientes das balanças passam por uma tremonha, que fará a alimentação da extrusora. Dentro da extrusora, ocorre a mistura dos diversos ingredientes, originando um novo produto. A grande vantagem deste tipo de configurações, deve-se ao facto de se conseguir atingir grandes quantidades de produção sem que seja necessário haver paragens, limpezas e reprocessamentos, no entanto, serve apenas para um tipo de produto. A limpeza torna-se complicada, apesar dos poucos componentes utilizados, uma vez que é necessário

mudar os ingredientes e calibrar as balanças. Na tremonha há ocorrência de instabilidades, isto é segregação. Esta configuração produtiva apresenta elevados custos iniciais de investimento mas revela-se vantajosa para a produção de mono produtos. A Figura 2–12 apresenta um diagrama de fluxo de operações, tarefas e acções a realizar neste tipo de montagem/configuração fabril.



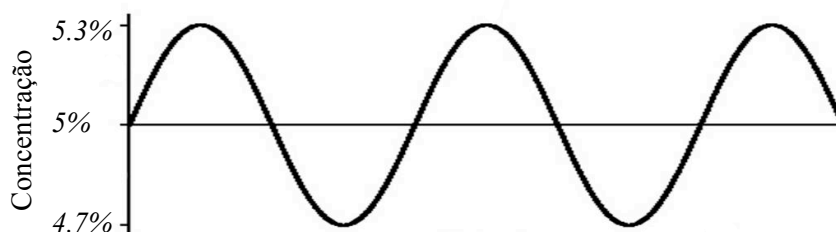
**Figura 2–12 – Diagrama de fluxo de operações. Alimentação automática.**

A segunda configuração, também dentro da alimentação automática, apresenta processos automáticos exceptuando o controlo do nível de *stock*, que tem de ser realizado por um operador. Apresenta dois percursos para os ingredientes. O grão é constantemente adicionado à extrusora, começando a ser processado individualmente. A meio do processamento do grão, isto é, a meio da extrusora, é adicionado o pó, que é previamente doseado por balanças gravimétricas, e assim alimenta a extrusora, através de um alimentador lateral (*side feeder*). Há um problema que poderá ocorrer devido ao facto de a  $y\%$  poder fazer variar o produto final, pois pode ocorrer segregação em *hl*, fazendo variar a mistura. Pequenas variações, inferiores de  $0.3\%$ , podem originar grandes alterações do produto, como por exemplo a cor ou propriedades físicas. O gráfico da Figura 2–14 demonstra variações de concentração do produto. Uma das vantagens deste tipo de configuração é, a possibilidade de mudança de ordem, apenas com alteração das percentagens da fórmula, mantendo os componentes. Basta ajustar os parâmetros das balanças para obter novos produtos. Este tipo de opção costuma ser de elevado custo, porém, é possível um retorno a curto prazo, pois consegue produzir produtos, apesar de diferentes, muito semelhantes entre si, em larga escala. A Figura 2–13 apresenta um diagrama de fluxo de operações, tarefas e acções a realizar neste tipo de montagem/configuração fabril.



**Figura 2–13 – Diagrama de fluxo de operações. Alimentação automática.**

Sabe-se que pequenas variações na concentração dos ingredientes resultam em alterações no produto final. Um exemplo disso foi constatado na ISOLAGO. Pequenas variações de 0.3% na concentração de pigmentos colorantes resultam numa alteração de cor que, quando analisada, fica fora dos parâmetros de qualidade e/ou do desejado pelo cliente. Um exemplo de como ocorre a variação pode ser observado na Figura 2–14. Este tipo de variações ocorre devido a vários factores, como erro de operador, balanças/alimentadores descalibrados, segregação, entre outros anteriormente mencionados.



**Figura 2–14 – Gráfico de variação do produto final.**

## 2.5 Processo de Pré-Mistura

O processo de pré-mistura é um processo que faz a mistura dos diversos ingredientes de um futuro produto plástico. Normalmente os ingredientes são os polímeros e os aditivos, que se encontram em diversas formas: pó, granulado, escamas, fibras, etc.. Em muitos dos processos de extrusão, a mistura não ocorre somente na extrusora, sendo necessário recorrer à pré-mistura, que pode ocorrer directamente no alimentador na extrusora ou ocorrer num misturador sendo a extrusora posteriormente alimentada.

Assim, para melhor interpretação do princípio de funcionamento das misturadoras/alimentadores e do percurso dos ingredientes desde o armazém até à extrusora, é

necessário saber distingui-los entre *batch* (lotes) e contínuo ou entre *off-line* e *in-line mixers* [12].

### **2.5.1 *Batch* ou *off-line mixer***

*Batch* ou *off-line mixer*, é o processo mais comum a ser encontrado na indústria de mistura e processamento dos plásticos com aditivos. Ocorre antes da entrada da mistura na linha de extrusão, isto é, a mistura é efectuada num ou mais misturadores e, posteriormente, levada para o reservatório de alimentação da extrusora, para a tremonha (*hopper*). Não sendo um processo contínuo, advém que, por cada hora de produção, sejam  $x$  kg misturados. Uma das vantagens na utilização deste tipo de configuração é a redução do custo de equipamentos, pois é possível elevar a capacidade de mistura relativamente à capacidade da extrusora, podendo uma misturadora alimentar várias extrusoras. As desvantagens são: excessiva matéria em processamento e transporte; potenciais erros de pesagem; segregação e contaminação da mistura durante o transporte para a(s) extrusora(s); ocorrência de desperdícios [12].

Exemplos de um processo *batch*, são representados na Figura 2–10 e na Figura 2–11.

### **2.5.2 *Contínuo* ou *In-line mixer***

Contínuo ou *in-line mixer* é um processo que faz a mistura dos plásticos e aditivos ocorrer na linha de extrusão, isto é, o reservatório de alimentação da extrusora é a misturadora. Este tipo de processo é extremamente eficaz para grandes produções do mesmo produto, uma vez que fazer a mudança de ordem de produção pode causar uma paragem por algum tempo. Algumas vantagens são: menos matéria em processamento e transporte; alimentação conforme a capacidade da extrusora, não havendo potenciais desperdícios; riscos de contaminação reduzidos; caso usados, balanças/alimentadores gravimétricos asseguram um rácio de alimentação adequado para a extrusora em funcionamento; toda a produção pode ser automatizada e controlada; produção de menos desperdícios. Algumas desvantagens: custos elevados; paragens da linha de produção durante limpeza/mudança de ordem; tempos de processos reduzidos, devido a mudanças de ordem [12].

Exemplos de processos contínuos, estão representados na Figura 2–12, Figura 2–13 e Figura 2–15.

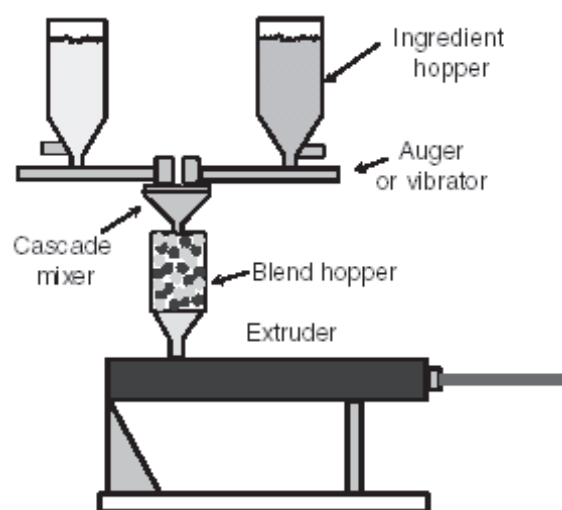


Figura 2-15 – Processo de extrusão *In-line* [12].

A Tabela 2-3 apresenta algumas diferenças entre os processos contínuos e o *batch*.

Tabela 2-3 – Comparação entre os processos Contínuos e *Batch*.

	Contínuos	<i>Batch</i>
<b>Custo das máquinas</b>	Alta	Baixa
<b>Quantidade de produção</b>	Alta	Baixa
<b>Tempos de paragem/ mudança de ordem</b>	Raro	Frequente
<b>Força de trabalho</b>	Poucos operadores são necessários	Alguns operadores são necessários
<b>Definição de novos parâmetros</b>	Relativamente fácil	Complicado
<b>Número de linhas que conseguem alimentar</b>	Uma	Várias
<b>Possíveis erros de pesagem</b>	Reduzido	Elevado
<b>Uniformidade do pré-mix</b>	Constante	Variável
<b>Ocorrência de Contaminação</b>	Baixa	Alto, devido ao fornecimento de várias linhas

## 2.6 Equipamentos de mistura/misturadores

Existe um vasto leque de equipamentos de mistura, alguns desenhados especificamente para uma determinada função, mas a maior parte é considerada de função comum, ou seja, a de misturar. Para melhor interpretação dos equipamentos de mistura, é

também necessário saber quais são as suas vantagens e desvantagens bem como a aplicabilidade tanto para o processo *batch* como para o contínuo.

Existem três categorias de equipamentos de mistura, sendo diferenciados pelo seu princípio de funcionamento. As categorias são então, *tumble blender*, *ribbon blender*, *fluidized bed mixers*. Um dos equipamentos de mistura mais simples e comum de se encontrar na indústria é o *tumble blender*, pois este combina um escoamento gravitacional com a rotação do reservatório [8].

É agora explicado o princípio de funcionamento de cada categoria dos equipamentos que ajudam na mistura [8], [12], [18]:

- ***Tumble blenders*** – Reservatório fechado que roda sobre o seu eixo, forçando as partículas a colidirem umas com as outras. Como as forças gravíticas são uma das principais forças que ajudam na mistura e, como resultado, pode ocorrer segregação, este tipo não é tão eficaz para diferentes tamanhos de partículas. O reservatório pode apresentar várias configurações como tambor (*drum roller*), cone, duplo cone, V-, Y-, entre outros. No duplo cone, os dois cones são unidos pela sua base. A mistura ocorre devido à rotação sobre o seu eixo. São relativamente fáceis de limpar e são mais apropriados para pós densos, sólidos frágeis e materiais abrasivos. Garante qualidade na mistura, mesmo que alguns ingredientes estejam presentes em pequenas quantidades ( $< 1\%$ ) ou com diferentes dimensões e densidades. A geometria permite uma rápida e completa descarga do material misturado. Devido à geometria de grandes dimensões e à rotação, este ocupa algum espaço. Não são apropriados para quebrar aglomerados mas podem causá-los. Por vezes, têm hélices ou pás para os quebrar/evitar. Este tipo de *mixers* não são muito versáteis para materiais pegajosos e pastosos. Um exemplo de duplo cone é apresentado na Figura 2–16.

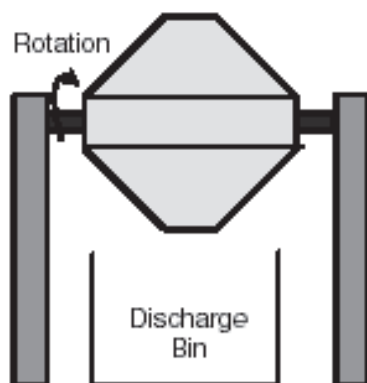


Figura 2–16 - *Double V-cone* [12].

- ***Ribbon blenders/Convective Mixers*** – São os mais utilizados na mistura de partículas sólidas e conhecidos por exibir várias geometrias destacando-se a rectangular e a cónica. O reservatório rectangular, como ilustrado na Figura 2–17, está imóvel com

lâminas helicoidais ao longo do seu comprimento. A mistura é devido à rotação das lâminas que transportam um grupo de partículas de uma região para outra. Podem ser apenas de mistura, como de mistura e alimentação em simultâneo, podendo ser utilizado tanto em sistemas *batch* como contínuos. O reservatório em cone, também chamado do vertical *blender*, possui um sem-fim que roda e gira simultaneamente, transportando as partículas desde a base do cone até ao topo, ocorrendo assim a mistura, como ilustrado na Figura 2–18. O efeito de *convective mixing* é criado por 3 factores: 1) mistura axial pelo sem-fim, 2) mistura radial pela forma do cone, 3) mistura tangencial pelo braço. Apresentam uma capacidade de mistura entre os 40% e os 100%.

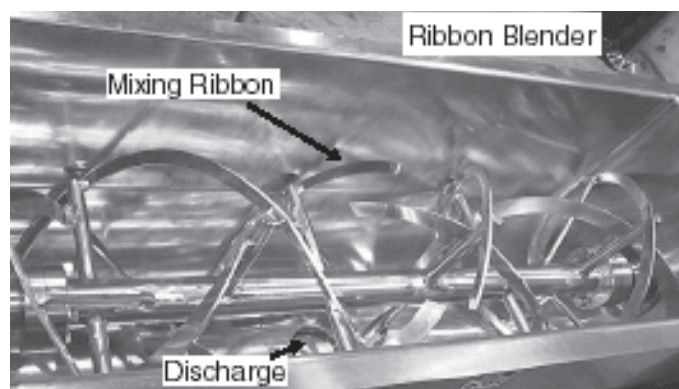


Figura 2–17 - Ribbon blender [12].

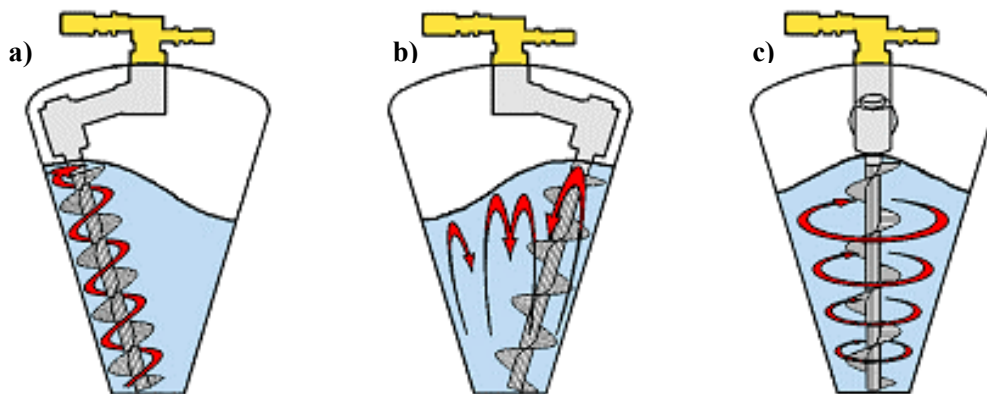


Figura 2–18 – Vertical blender. Em a), b) e c) as setas a vermelho representam o movimento das partículas.

Em a) e c) as mesma setas representam o movimento do sem-fim [19].

- **Fluidized bed mixers** – Têm o objectivo de baixar a densidade e aumentar a mobilidade das partículas sólidas aproximando-as a um comportamento parecido com um fluido. Para tal, um gás, com alta intensidade e criando turbulência, é forçado a passar por uma camada de partículas, obtendo-se excelentes misturas. Para que não ocorra segregação, é necessário que a turbulência gerada ocorra em toda a massa de material existente na mistura. Um *fluidized bed mixer* é constituído por inúmeros componentes como apresentados na Figura 2–19. Este tipo de *mixers* é substancialmente mais caro comparado com os dois descritos anteriormente. Uma

enorme vantagem tem a ver com o tempo de ciclo ser extremamente curto. Contudo, materiais com tamanhos  $>30\mu\text{m}$  e para materiais muito coesivos é difícil que estes fiquem fluidos (*fluidize*).

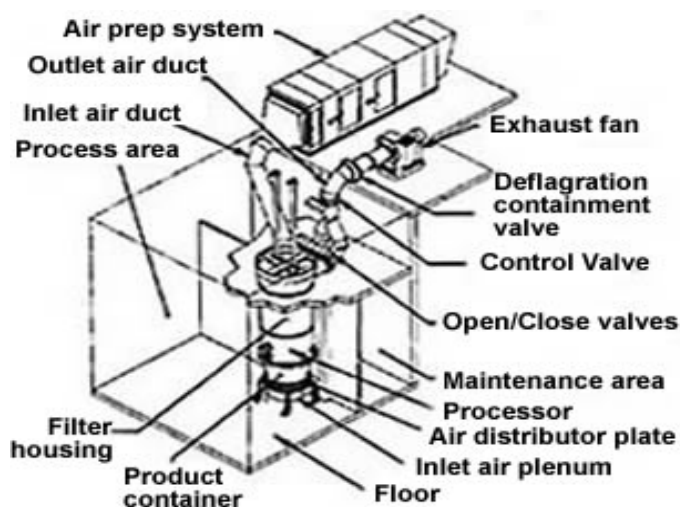


Figura 2-19 – Exemplo de *fluidized bed mixer* e respectiva legendas dos componentes [20].

A Tabela 2-4 faz a comparação entre 3 tipos de misturadoras mais utilizadas, *tumble*, *ribbon* e *fluidized*.

Tabela 2-4 – Comparação de diferentes misturadores [8].

Misturadores	<i>Tumble blenders</i>	<i>Ribbon blenders</i>	<i>Fluidized mixers</i>
<b>Mecanismos de mistura</b>	Gravitacional	Convectivo	Convectivo
<b>Tipo de construção</b>	Simples	Meio complexo	Complexo
<b>Tendência a segregar</b>	Alta	Baixa	Baixa*
<b>Facilidade de limpeza</b>	Bom	Mau	Médio
<b>Tempo de ciclo</b>	Lento ( $\pm 15\text{min}$ )	Médio (3-6min)	Curto (1-2 min)
<b>Problemas de descarga</b>	Rápido	Elevado	Mínimo
<b>Escoamento livre de materiais</b>	Bom	Mau	Bom
<b>Coesão</b>	Mau	Bom	Mau
<b>Materiais pegajosos</b>	Mau	Bom	Mau

\* excepto quando há diferentes densidades do material seco, existindo forte tendência para que ocorra segregação.

Existe ainda um outro tipo de *mixers*, os *high intensity mixers*. Pode variar em geometria e tamanho mas com o mesmo princípio de funcionamento. No fundo do reservatório existem umas lâminas que rodam a alta velocidade criando um vortex, ocorrendo assim a mistura. É também criado calor devido ao atrito, embora nunca chegue a aquecer o suficiente para derreter o ingredientes, conferindo assim uma melhor qualidade à mistura. Estes *mixers*, fornecem baixos tempos de ciclo de mistura. São usados para dispersar



pequenas concentrações (<2%) de aditivos com polímeros em pó. São normalmente utilizados para misturar estabilizantes e plastificantes com PVC [12].

## 2.7 Equipamentos de manuseamento, alimentação e de transporte dos materiais

Na indústria existe um elevado número de equipamentos para as mais diversas funções, tais como manusear, medir, pesar, alimentar e transportar.

### 2.7.1 Manuseamento e Alimentação

Para o manuseamento dos materiais a serem utilizados e processados num processo de extrusão, para melhor medir ou quantificar as quantidades usadas são utilizadas balanças/medidores. Podem ser manuais ou automáticas, isto é, ou o operador pesa as quantidades ou existe um mecanismo que o faz automaticamente. Em ambos os casos, o procedimento seguinte é alimentar misturadores, tremonhas e/ou extrusoras.

Assim, dentro do leque das balanças/medidores automáticos, existem duas vertentes, os gravimétricos e os volumétricos. Ambos, caso a montagem e finalidade o exijam, podem também surgir como alimentadores automáticos (*feeders*).

- **Balanças/alimentadores gravimétricos:** Em muitos dos casos, apresentam geometrias semelhantes a tremonhas. No seu interior pode-se encontrar um sem-fim ou um dispositivo vibratório. São mais sofisticados e fazem a medida e a pesagem por perda de peso (*loss-in-weight*). À medida que o material é descarregado da balança/alimentador, o peso é monitorizado e convertido para peso por unidade de tempo (kg/h). Para obter um escoamento constante de material, a velocidade do sem-fim ou as amplitudes de vibração controlam o rácio de alimentação. Durante o seu funcionamento, é aconselhável que não sejam tocados para evitar desajustes de programação, a não ser que seja quando se está a introduzir mais material, para não haver paragens. Podem também ocorrer erros de pesagem e alimentação, com consequente descontrolo da programação, caso ocorra segregação ou *arching* [12], [18], [21], [22]. A Figura 2–20 ilustra uma balança/alimentador gravimétrico.



Figura 2–20 – Balança/Alimentador gravimétrico (*Gravimetric feeder*) [21].

- **Balanças/alimentadores volumétricos:** Servem para medir uma quantidade de volume de material por unidade de tempo (litro/h) baseado na rotação constante de um fuso/sem-fim, situado na base de um silo ou tremonha. Maior ou menor velocidade de rotação faz alterar a quantidade medida. São a opção/solução mais simples e económica, a nível de componentes, disponível no mercado, desde que não seja necessário uma elevada precisão do escoamento. Caso haja variações na densidade ou volume das partículas do mesmo material, a medição volumétrica consegue apresentar um erro de 1% a 3% para os diversos materiais [12], [18], [23], [24]. A Figura 2–21 ilustra uma balança/alimentador volumétrico.

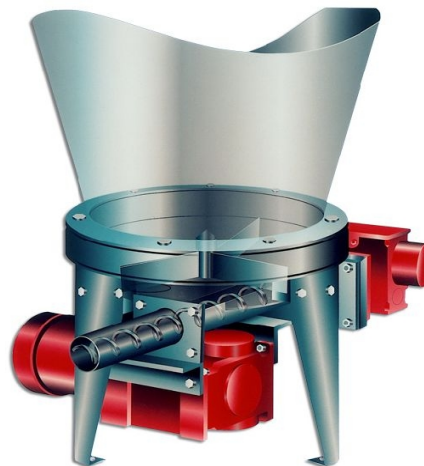


Figura 2–21 – Balança/alimentador volumétrico (*Volumetric feeder*) [23].

Vantagens de alimentadores gravimétricos face a volumétricos [12], [21]:

- Controlo preciso da quantidade com ajustamento automático;
- Redução de custos com desperdícios;
- Produções mais longas com consistente output da extrusora;

- Detecção de erros de formulação e contaminações antes de o produto estar acabado.
- Melhor qualidade do produto final

Desvantagens de alimentadores gravimétricos face a volumétricos [12]:

- Mais dispendiosos;
- Calibração e programação dos controladores complicados.

### 2.7.2 Manuseamento e Transporte

Para transportar a mistura até ao reservatório de alimentação, podem ser utilizados os seguintes equipamentos/sistemas [12]:

- **Sistema de vácuo** – Canalização com pressão que faz o movimento dos materiais. Figura 2–22.
- **Tapetes rolante** – Estradas de tapetes que fazem o transporte dos materiais.
- **Fuso/Sem-fim** – Elevação e transporte do material para posterior alimentação devido à rotação do fuso e de este conter uma rosca helicoidal.
- **Vagões** – Recipiente com rodas, que pode ser transportado em carris ou livremente.
- **Empilhadora** – Transporte de sacos ou paletes até ao local desejado.
- **Alimentação Directa** – Mistura ocorre numa misturadora que continuamente alimenta o reservatório de alimentação da extrusora. Normalmente a alimentação ocorre por gravidade.

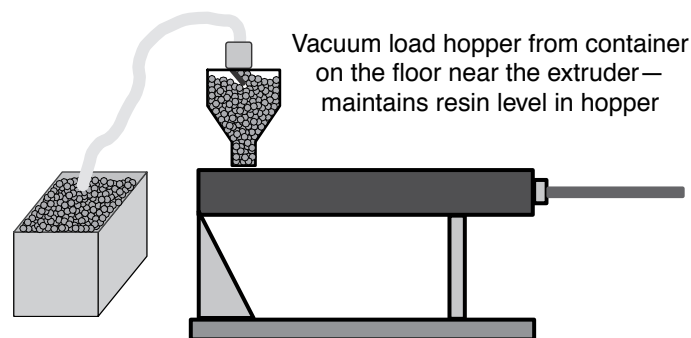


Figura 2–22 – Alimentador de vácuo [12].

## 2.8 Matéria Prima

A matéria prima mais utilizada na indústria está dividida em duas categorias, os termoplásticos e os aditivos/ajudantes de processo. São identificados alguns termoplásticos e aditivos como demonstra a Figura 2–23.

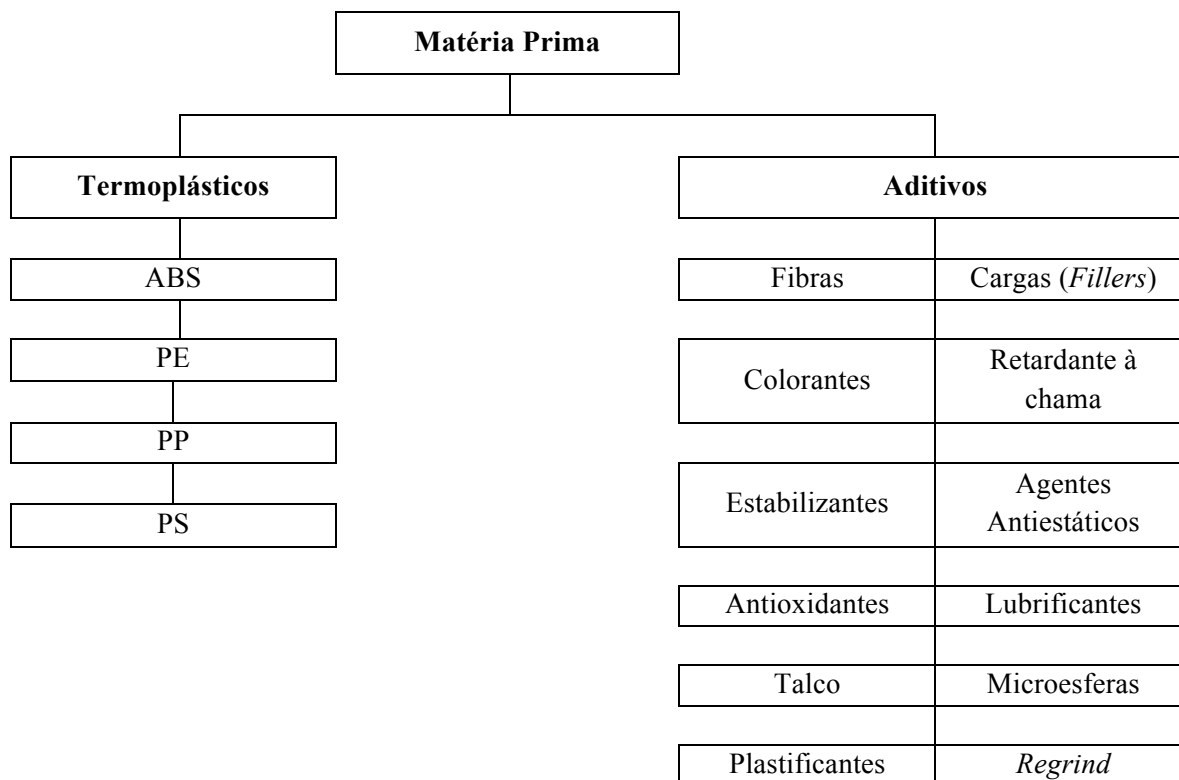


Figura 2–23 – Diagrama com matéria Prima, termoplásticos e aditivos utilizados na indústria dos plásticos.

As formas de como se podem encontrar os termoplásticos, pó, escamas e granulado são apresentados na Figura 2–24. Também os aditivos se encontram normalmente em pó, mas também podem ser encontrados em estado líquido, conforme o tipo de mistura ou fase do processo.



Figura 2–24 - Tipos de resinas plásticas – a) Pó, b) escamas, c) granulado.

Para além das formas de como se podem encontrar os diferentes materiais, é também essencial saber o seu tamanho e, a isso, vem acoplado o tipo de escoamento que podem demonstrar. O tipo de escoamento encontra-se dividido em 2 tipos, livre e não livre. *Jenike* [25] utilizou a função de escoamento (*FF – flow function*) para fazer tal distinção, obtendo quatro classes:

- $FF > 10$       material com escoamento livre
- $10 > FF > 4$       material de fácil escoamento
- $4 > FF > 1.6$       material coesivo
- $FF > 1.6$       material sem escoamento livre, muito coesivo

*Kolatac* [26], distinguiu cinco classes, em vez das quatro de *Jenike*, com base na facilidade de manuseamento de partículas sólidas, como apresentado na Tabela 2–5.

**Tabela 2–5 – Classificação das partículas sólidas (Adaptado [26]).**

Classes	Tamanho de Partículas	Densidade	Compressibilidade	Coesão	Exemplos
<b>1: Granular</b>	1-20 mm	Uniforme	<5%	Nada	Granulado de plástico , sal seco
<b>2: Pó</b>	0.841-0.074 mm	Varia ligeiramente	5-15%	Ligeiramente	Farinha, areia de sílica fina
<b>3: Pó</b>	0.074-0.037 mm	Varia devido as bolsas de ar	≥20-30%	Moderado	Carbono, cinza
<b>4: Pó</b>	0.149-0.037 mm	Variação significativa	≥20-30%	Adesivo	Carbonato de cálcio, pigmentos
<b>5: Irregular</b>	3x12 mm	Massa permeável	2-10%	Tendência para interligação	Fios de fibra de vidro, plástico reciclado

Um terceiro método foi analisado, distinto dos anteriormente apresentados, para a classificação do escoamento de partículas sólidas. As forças que actuam no material em pó que se encontram na tremonha tendem a compactar o pó (aumentando a densidade do mesmo) e as tensões de corte no material fazem com que este escoe. *Jenike* [25] mostrou que, para qualquer posição de uma partícula dentro de um escoamento de massa numa tremonha, o rácio  $ff_c$  apresenta um valor constante e pode ser calculado a partir da seguinte expressão:

$$ff_c = \frac{\text{compacting stress}}{\text{applied shear stress}} = \frac{\sigma_1}{AS} \quad (2.10)$$

Por meio de um rácio, *flow function* –  $ff_c$ , que utiliza a tensão de escoamento não confinado  $\sigma_c$  em função da tensão de consolidação  $\sigma_l$  e do tempo de armazenamento  $t$ . Quanto maior for  $ff_c$ , melhor será o escoamento das partículas. As classes definidas por este rácio são [27]:

- $ff_c < 1$  não escoa
- $1 < ff_c < 2$  muito coesivo
- $2 < ff_c < 4$  coesivo
- $4 < ff_c < 10$  de fácil escoamento
- $10 > ff_c$  escoamento livre

A Figura 2–25 mostra a relação entre o tipo de escoamento de uma função exemplo  $A$  [27] para valores constantes de  $ffc$ , bem como as regiões dos diferentes tipo de escoamento das partículas sólidas.

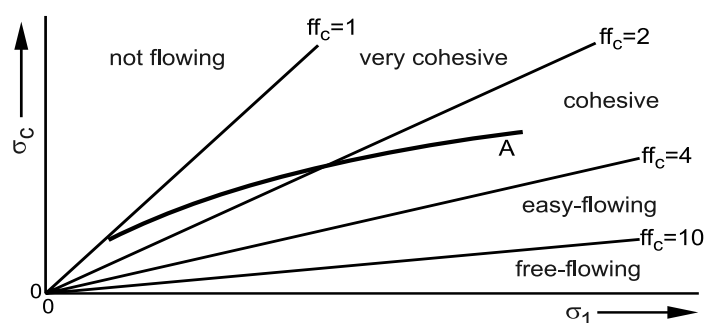


Figura 2–25 – Linhas para valores de  $ffc$  constantes [27].

Um outro factor a ter em conta, é a compressibilidade, que significa a capacidade de compactação do material. Quanto maior for a compressibilidade, ficando o material mais compactado, mais problemas de escoamento ocorrem. Esta é uma característica que pode determinar se o escoamento é livre ou não. A Tabela 2–5 apresenta também, em percentagem, a compressibilidade dos tipos de materiais utilizados na indústria de plástico.

O ângulo de repouso é o ângulo máximo formado entre o plano horizontal e a pilha de material no qual uma pilha de partículas consolidadas podem ficar paradas, como exemplifica a Figura 2–26. Embora já não seja utilizado, devido a melhores aproximações à realidade do escoamento, este foi em tempos tanto utilizado para determinar o tipo de escoamento como para projectar tremonhas e silos [13], [28].

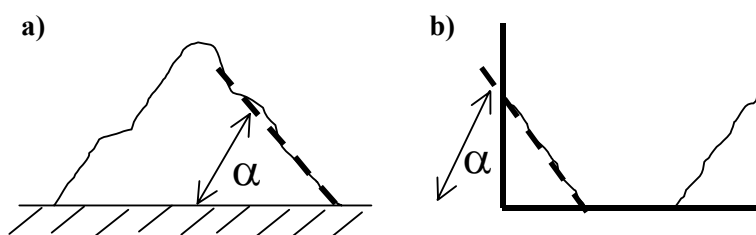


Figura 2–26 – Ângulo de repouso  $\alpha$ , de uma pilha de pó a) num plano horizontal, b) num recipiente [28].

### 2.8.1 Os Termoplásticos

Os termoplásticos são materiais que, para se tornarem moldáveis, necessitam de ser aquecidos de forma a serem amaciados, adquirindo a consistência de um líquido, sendo designado nesta forma plástico fundido. Quando arrefecem, adquirem a forma para a qual foram moldados. Se voltarem a ser aquecidos, podem adquirir novas formas. Resumindo, os termoplásticos necessitam de calor para serem enformados, são reversíveis e recicláveis e são os mais utilizados na indústria do plástico [1], [29].

Os termoplásticos utilizados na produção dos Isocolors na ISOLAGO e enunciados nesta dissertação são o Acrilonitrila butadieno estireno (ABS), Polietileno(PE), Polipropileno (PP) e o Poliestireno (PS).

No uso de qualquer material, existem sempre vantagens e desvantagens associadas, como demonstrado na Tabela 2–6, que faz comparação da utilização de plásticos com outros materiais como o metal ou o vidro.

**Tabela 2–6 – Vantagens e Desvantagens na utilização de plásticos (Adaptado [29]).**

<b>Vantagens</b>	<b>Razões/Aplicações</b>	<b>Desvantagens</b>	<b>Razões/Aplicações</b>
<b>Massa/Densidade</b>	Baixas densidades, ótimo para restrição de peso	<b>Solicitações mecânicas localizadas</b>	Possível necessidade de inserções metálicas
<b>Aparência Superficial</b>	Facilidade em tingir, de apresentar superfície polida, fosca, inscrições, símbolos	<b>Elevada temperatura de funcionamento</b>	Risco de derreter/degradar se utilizado com temperaturas contínuas acima dos 100°C
<b>Qualidade ópticas</b>	Peças translúcidas e transparentes	<b>Investimento elevado</b>	Matriz de custo elevado e necessidade de mão de obra especializada
<b>Resistência Química</b>	Resistência a óleos, solventes, ácidos, etc.		
<b>Flexibilidade</b>	Peças com dobradiças		
<b>Resistência Elétrica</b>	Mau condutor elétrico		
<b>Resistência ao Choque</b>	Relativamente ao vidro, apresenta maior resistência a quedas e choques		
<b>Condutividade Térmica</b>	Baixa condutividade térmica e resistência ao calor		

### **2.8.2 Os Aditivos, ajudantes de processo**

Os plástico não são normalmente constituídos apenas por polímeros, contudo, contêm outras substâncias, os aditivos ou ajudantes de processo. A incorporação de aditivos no plástico, serve para alterar as propriedades químicas, térmicas, mecânicas e/ou até o custo de fabricação. Os aditivos podem aumentar/diminuir e/ou conferir/eliminar determinadas características e propriedades. Facilitam também no processamento e obtenção de características especiais [29], [30], [31].

Há aditivos que são extremamente eficazes, mesmo que utilizados em pequenas percentagens (0.1-1%). Por outro lado, há aditivos que podem dominar a mistura, com o intuito de atingir maior rigidez e/ou reduzir custos. A Tabela 2–7 sintetiza os efeitos e as percentagens de utilização dos aditivos mencionados na Figura 2–23, obtidas na ISOLAGO.

**Tabela 2–7 – Aditivos, efeitos e percentagem de utilização.**

<b>Aditivos</b>	<b>Efeitos</b>	<b>Percentagem de Utilização (%)</b>
<b>Fibras (fibra de vidro e carbono)</b>	Aumentar o módulo de elasticidade, tensão, rigidez, flexão à temperatura	0 a 20
<b>Cargas (<i>fillers</i>) (mica, talco e carbonato de cálcio)</b>	Diminuir custos	0 a 30
<b>Pigmentos/Corantes</b>	Conferir cor	1 a 15
<b>Retardante à chama</b>	Impedir propagação de chama. Aumentar resistência ao calor	± 25 (se necessário)
<b>Estabilizante de luz</b>	Proteger contra degradação pela exposição à luz UV	± 5 a 10
<b>Anti-estáticos</b>	Evitar electricidade estática, retenção de partículas	0 a 2
<b>Antioxidantes</b>	Evitar ou retardar degradação causada pela oxidação	0.5
<b>Lubrificantes</b>	Facilitar o processamento ou performance	0.5
<b>Plastificantes</b>	Diminuir o módulo de elasticidade	0.5
<b>Reciclado/<i>Regrind</i></b>	Introduzir novamente na mistura plástico proveniente de desperdício.	0 a 5

## **2.9 Instabilidade de escoamento associado à tremonha**

Como referido anteriormente em §2.3.2, a tremonha não pode ser uma fonte de instabilidade e causar entraves ao processo produtivo. Também foi referido o tipo de escoamento, que pode ser: a) um escoamento de massa (*mass flow* – todo o material na tremonha está em movimento, mas sem a mesma velocidade); b) escoamento em funil (*funnel flow* – o material apresenta movimento apenas na zona central, criando um funil de escoamento). Existe ainda um terceiro tipo de escoamento, que é uma combinação dos dois escoamentos anteriores, sendo denominado de escoamento expandido (escoamento de massa sob escoamento em funil). A Figura 2–27 representa exemplos de escoamento expandido.



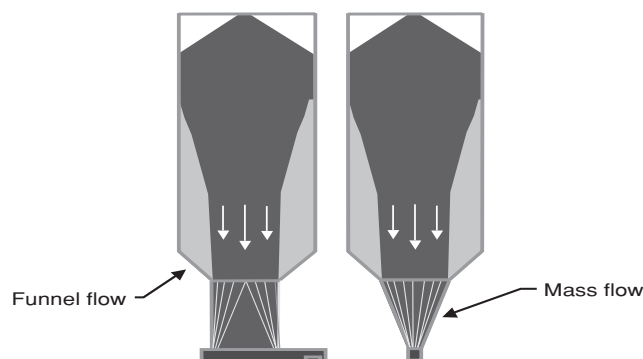


Figura 2–27 – Exemplos de escoamento expandido [32].

Estes podem trazer vantagens, mas também desvantagens para o processo. A Tabela 2–8 sintetiza as vantagens e desvantagens dos dois escoamentos, do escoamento de massa e do escoamento em funil.

Tabela 2–8 – Vantagens e Desvantagens de *Mass* e *Funnel flow* (Adaptado [28]).

	Vantagens	Desvantagens
<b><i>Mass flow</i></b> (escoamento massa)	Escoamento mais consistente	Maior desgaste das paredes
	Segregação radial reduzida	Valores de tensões elevadas nas paredes
	<i>First-in = First-out</i>	Necessidade hopper silo com maior altura
	Uso eficaz da capacidade do hopper	
	Tensões nas paredes previsíveis	
<b><i>Funnel Flow</i></b> (escoamento funil)	<i>Hoppers</i> de menor altura	Ocorrência de <i>ratholing</i>
		Segregação
		<i>First-in = Last out</i>
		<i>Time consolidation</i> podem ser problemáticos
		Distribuição deficiente de tensões na parede, podem originar colapso do hopper
		<i>Flooding/flushing</i>
		Redução da capacidade de armazenamento do hopper

O estudo realizado por diversos autores [27], [28], [32], [33], apresenta problemas de escoamento comuns em silos na secção cónica. Estes problemas ocorrem nos três tipos de escoamento mencionados. A causa pode ter origem tanto devido ao *arching/bridging* (arco), ao *ratholing* (tubo), ao *funnel flow* (escoamento em funil), ao *flooding/flusing*, ao *flow rate* (caudal) e ao *particle segregation* (segregação). Em todos os casos, grande parte ou todas as partículas ficam imóveis, deixando de existir escoamento.

- **Arco (*Arching/bridging*)** – Um arco ou ponte é formado exactamente acima da saída da tremonha, obstruindo a saída de material, dividindo-se em 2 tipos, encravamento mecânico (*mechanical interlocking*) ou forças de coesão (*cohesive strength*). Encravamento mecânico surge devido às partículas serem grandes comparativamente com a saída da tremonha, obstruindo mecanicamente a passagem. Para evitar encravamento, a dimensão do *outlet* tem de ser 6 a 8 vezes a dimensão característica das partículas usadas no processo. Contudo, a dimensão característica da partícula não está correctamente definida. No caso de forças de coesão, este ocorre devido à compactação das partículas e posterior bloqueio do *outlet*. Porém, para as evitar, não é apenas necessário dimensionar o *outlet* da tremonha, mas também fazer testes de escoamento para determinar a *flow function* do material que irá relacionar as forças de coesão com a pressão de consolidação. A Figura 2–28 apresenta a diferença entre *interlockong* e *cohesive arching*.

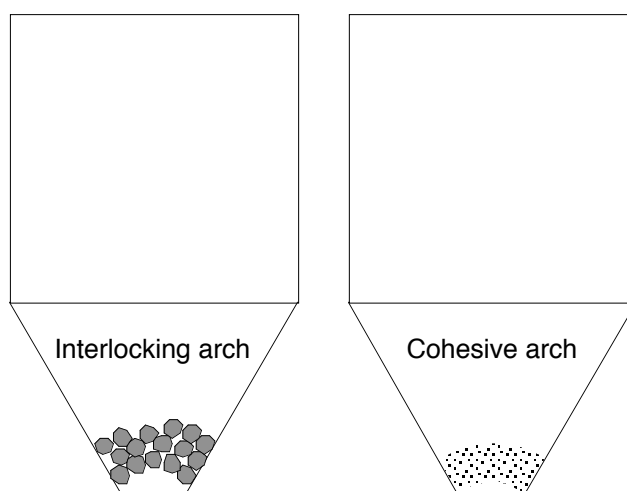


Figura 2–28 – Diferenciação entre *interlocking* e *cohesive arching* [33].

- ***Ratholing/funnel flow*** – Devido à aderência e consequente estagnação das partículas na parede do *hopper*, é formado um tubo na zona superior do *outlet*. Existem então dois tipos de escoamentos, em tubo (*ratholing*) e em funil (*funnel flow*). No primeiro, apenas há escoamento no interior do tubo enquanto que o segundo tem um escoamento semelhante ao que acontece num funil. Para eliminar estes fenómenos existem três possibilidades: a utilização de aditivos para evitar a aderência entre as

partículas e a parede da tremonha; a alteração do ângulo do cone visto que diferentes ângulos ajudam a ultrapassar as forças de ficção e consequentemente as de coesão; a da dimensão do *outlet*. Caso existam forças de coesão elevadas, assim que o “tubo” fica vazio deixa de haver escoamento mas continua a existir material dentro da tremonha. A Figura 2–29 apresenta um exemplo de *ratholing* enquanto a Figura 2–30 exemplos de *funnel flow*.

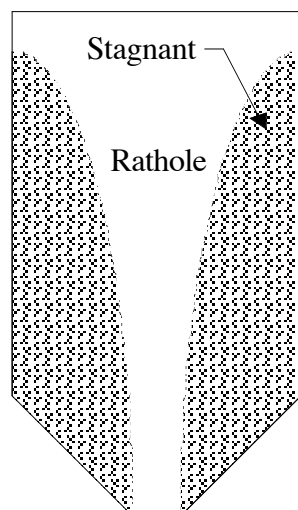


Figura 2–29 – *Rathole* [33].

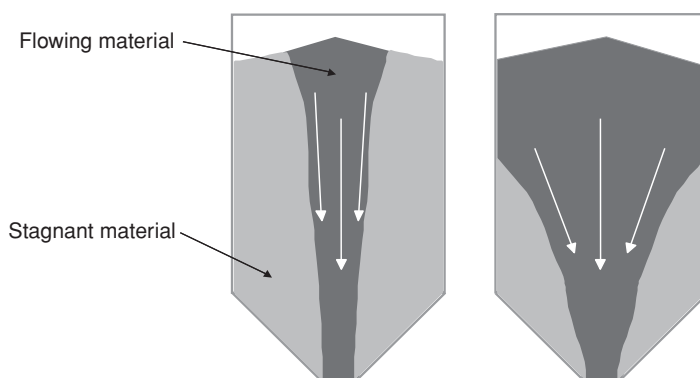


Figura 2–30 – Exemplos de *funnel flow* [32].

- ***Flooding/flushing*** – Este fenómeno ocorre quando se está a operar com pós finos, como pigmentos e alguns aditivos. Resultantes do colapso do *rathole*, as partículas de pó em contacto com o ar quente proveniente da extrusora transformam-se em líquido. Em condições normais de processamento, são apenas utilizadas partículas sólidas. A transformação destas em líquido origina um descontrolo na alimentação da extrusora. A Figura 2–31 apresenta um exemplo de *flooding/flushing*.

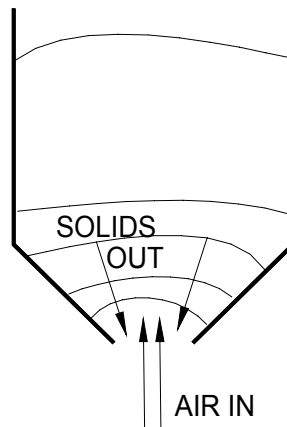


Figura 2-31 – Exemplo de *flooding/flushing* [28].

- **Particle segregation** – Quando existe uma variedade no tamanho e/ou densidade das partículas que constituem a mistura a ser processada, ocorre a formação de camadas segundo o tipo de grão. A Figura 2-32 apresenta o resultado da formação de camadas. A segregação é indesejada porque pode causar reacções químicas, variações na qualidade e contaminações. Consequência disto é o reprocessamento ou desperdício da produção.

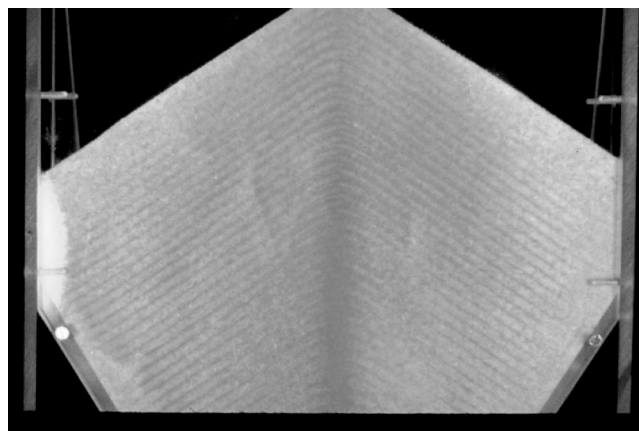


Figura 2-32 – Exemplo de formação de camadas. *Particle segregation* [32].

- **Flow rate** – Problema afectado pelos pós finos, uma vez que apresentam baixa permeabilidade e são afectados por movimento de ar intersticial ou gases. O movimento dos gases origina variações no gradiente de pressões, o que resulta em problemas de descarga/escoamento, limitando assim o processo. Este tipo de problema não acontece quando se trata de materiais com escoamento livre, pois não são afectados pelos gases, não originando variações do gradiente de pressões.

## 2.10 Mudança de ordem, limpeza e manutenção das linhas

A paragem de produção pode ser influenciada por vários factores, tais como mudança de produto, manutenção, número de turnos e paragem ao fim de semana.

Os factores que influenciam paragens são: o tempo que o sistema vai estar parado; mudança de cor de claro para escuro ou escuro para claro; mudança da fórmula/receita a produzir; temperaturas do processo, compatibilidade da fórmula anterior para a que se quer produzir, etc. [12].

No processo produtivo de extrusão é crítica a mudança de cor, de matérias primas, das fórmulas/receitas, etc.. Cada mudança consome trabalho dos operadores e a extrusora não produz. Um exemplo prático é a mudança de cor, pois a sequência de cor tem influência no tempo de mudança de ordem, porque mudar de Incolor para Preto é mais rápido que limpar a linha de Preto para Incolor.

Para se ter a percepção do tempo que demora a mudança de ordem de produção de cores, apresenta-se a Tabela 2–9 que foi obtida durante a visita a empresas.

**Tabela 2–9 – Tempos de mudança de ordem com 2 operadores**

Tempo de mudança de ordem em horas		Para				
		Incolor	Preto	Castanho	Cinzento	Branco
De	Incolor	-	0.5	0.5	0.5	0.5
	Preto	4	-	2	1	3
	Castanho	3	0.5	-	1	3
	Cinzento	3	0.5	0.5	-	2
	Branco	2	1	1	0.5	-

A limpeza e manutenção são operações igualmente importantes. Em muitos casos, na linha responsável pela produção de um produto apenas, é necessário haver limpeza e manutenção de forma a calibrar balanças e controladores, para evitar contaminações e manter um nível de qualidade de produto constante.

Alguns passos de como é realizada a limpeza e manutenção de uma linha de extrusão são:

- Caso os novos produtos a produzir sejam compatíveis com as configurações anteriores de produção, produzir até esvaziar o alimentador. Em seguida utilizar uma resina plástica purgante para limpar o cilindro e o sem-fim.
- Dependendo do material a utilizar, variar as temperaturas no cilindro e a velocidade de rotação do sem-fim, para uma melhor extracção e limpeza do interior da extrusora.

Pode-se fazer correr a extrusora a seco de modo a extrair material do interior, evitando degradação.

- Quando é desligada a extrusora, limpam-se todos os componentes da linha associados ao processo de produção. Aproveita-se também para fazer a manutenção de material
- No arranque, fazer passar uma resina plástica para se atingir as configurações pretendidas para a nova produção, alcançar as temperaturas e rotação do sem-fim. Em seguida adicionar os materiais necessários para obtenção do novo produto.

No processo produtivo, o tempo que demora fazer uma mudança de ordem, manutenção, limpeza e entre paragens e arranques, tem também influência na eficiência da produção, pois é uma altura em que não se está a produzir, causando perdas económicas, por vezes significativas, para as empresas.

### **3 DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO E/OU IDENTIFICAÇÃO DE PROBLEMAS**

#### **3.1 Introdução**

Neste capítulo, após análise do processo actual de produção de concentrados de cor da empresa ISOLAGO, será explicado todo o processo produtivo, para melhor compreensão e enquadramento. Esta análise contém temas como mistura, alimentação, limpeza da linhas e transporte dos materiais a serem processados. Posteriormente, da mesma análise, serão apresentados e enumerados os problemas identificados.

No capítulo anterior, encontra-se o estudo científico sobre as causas e fontes de problemas. Chega-se então ao tema do presente capítulo, parte integrante desta dissertação, que visa como objectivo, enquadrar e resolver os problemas encontrados.

Após as explicações, serão identificados os possíveis pontos com vista a melhorias e optimização.

Todas as figuras apresentadas neste capítulo, foram obtidas na ISOLAGO.

#### **3.2 Processo Produtivo**

O processo global de produção, encontra-se dividido em pequenos processos, tais como, processo de mistura, alimentação, extrusão, limpeza e transporte. O processo de extrusão foi anteriormente descrito em §2.2.1.

Os processos de mistura, alimentação, limpeza e transporte são os abordados com principal interesse, uma vez que são uma das principais razões para a presente dissertação.

O processo produtivo em curso, é apresentado Figura 3–1 que mostra o produto que sai da extrusora quanto é arrefecido, cortado e levado por sistema de vácuo, para o *bigbag*, que pode ser observado no lado direito da na Figura 3–2.

Resumindo, o processo produtivo divide-se em várias fases. Iniciando-se com o *picking* da matéria prima do armazém para a área de mistura, onde são pesados manualmente os diversos aditivos e corantes. O polímero, os corantes e os aditivos são alimentados por um sistema de dosificação (balança/alimentador gravimétrico) da extrusora, que os incorpora na percentagem programada. Após a extrusão o composto sai pela cabeça da máquina para um sistema de corte, tomando então a forma de um granulado. O grão é então transportado pneumáticamente para um silo de arrefecimento e homogeneização. Periodicamente, são recolhidas amostras para controlo de qualidade. Neste tipo de indústria, é comum o material rejeitado ser reprocessado, geralmente adicionado a material virgem, numa percentagem

média de 30%. O material aprovado é embalado conforme o especificado pelo cliente e transportado por empilhador para o armazém de produto acabado. A Figura 3-3 apresenta a extrusora e o sistema de alimentação existente na ISOLAGO.



**Figura 3-1 – Produto semi-acabado proveniente da extrusora**



**Figura 3-2 – Parte final da produção, realizando o enchimento do *bigbag* visível à direita**





**Figura 3-3 – Extrusora e sistema de alimentação existente na ISOLAGO.**

Como mencionado anteriormente em §2.4.2, o sistema de alimentação existente na ISOLAGO aproxima-se ao do diagrama da Figura 2-11, com a exceção da alimentação lateral (*side-feeder*).

### **3.2.1 Mistura e manuseamento de materiais/ingredientes**

Existem pontos onde ocorrem mistura de materiais/ingredientes que serão apresentados pela ordem de ocorrência e fluxo de operações.

1. No misturador, é preparado os “one-pack” resultante dos diversos ingredientes que envolvem cada produto em causa e que são bastante variáveis de produto para produto. Basicamente consta de um produto relativo à cor base que se quer produzir juntamente com outras cores para conseguir o padrão desejado e ainda ajudantes de processo (lubrificantes, estabilizantes, antioxidantes, etc.). Todos os ingredientes neste ponto de mistura se encontram no estado sólido, mais propriamente, em pó. O material resultante desta mistura é depois transportado por um carrinho com tremonha para a linha de processamento. A Figura 3-4 apresenta o misturador e o “one-pack”. É importante mencionar que a pesagem é realizada manualmente por dois operadores com auxílio de uma balança, e por doses, de forma a ser mais rápido. As doses de cores são preparadas atempadamente porque há pouca capacidade de mistura de cor. Contudo, pequenas variações na pesagem (miligramas) podem originar escassez ou excesso de um qualquer ingrediente, provocando uma alteração no produto final, que terá de ser corrigido e reprocessado. Deste modo, perde-se tempo e,

consequentemente, a produção/hora cai para metade da sua capacidade. O misturador é um *high intensity mixer*.



**Figura 3-4 – Misturador *high intensity mixer* e a preparação dos “one-pack”**

2. Mistura manual (polímero+ carbonato + outro qualquer ajudante de processo) efectuada por operadores com a ajuda de uma balança. Estes fazem a pesagem dos diferentes ingredientes e, em seguida, juntam-nos num recipiente. A Figura 3-5 apresenta a preparação da mistura manual bem como da balança utilizada na pesagem dos diferentes ingredientes utilizados.



**Figura 3-5 – Preparação da mistura manual utilizando uma balança.**



3. O último ponto de mistura está associado a um sistema gravimétrico que controla o doseamento proporcional de dois produtos em função de uma % associada à produção/hora da linha (produção total = X % de material misturado no misturador + Y % do material misturado manualmente). No recipiente onde existe a primeira mistura de granulados com pós, as pás visíveis apenas ajudam no escoamento, não têm como função efectuar mistura. A Figura 3–6 apresenta o sistema gravimétrico, o recipiente e as pás. Entenda-se por granulado as resinas plásticas e os polímeros, enquanto que por pós, os aditivos e ajudantes de processo.



Figura 3–6 – Sistema gravimétrico doseador.

### 3.2.2 Alimentação

A alimentação da extrusora é executada pelo alimentador ou tremonha mas, devido a problemas de escoamento, foi criado um sistema de alimentação mais complexo, embora continue não muito eficiente.

Como pode ser visto na Figura 3–7, o sistema de alimentação apresenta dois andares. No topo encontra-se a matéria prima a produzir, a meio, encontram-se os dispositivos de medida, doseadores e alimentador da extrusora, no fundo, encontra-se a extrusora.



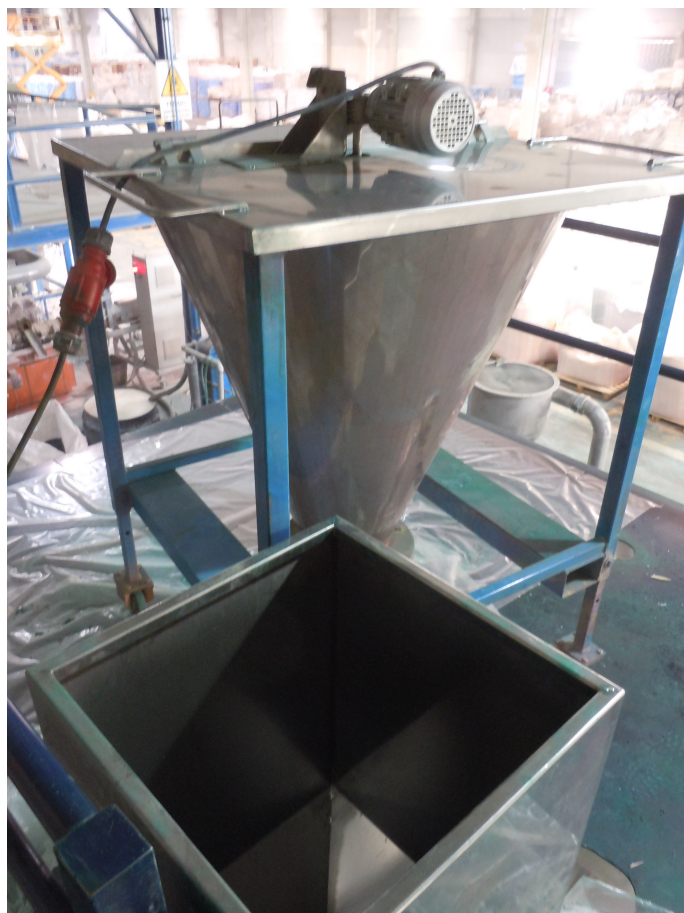
**Figura 3-7 – Sistema de Alimentação**

No topo, encontra-se o carrinho que contém os “one-pack”, como pode ser visto na Figura 3-8. Este faz a alimentação por um tubo de diâmetro variável (menor para maior) até a um dispositivo artesanal que se situa a meio. Este dispositivo é um pequeno funil côncavo, no qual foi acoplado um varão com pernos e que tem como finalidade quebrar possíveis aglomerados que possam ocorrer devido ao escoamento da mistura proveniente da tremonha. Para melhor compreensão do dispositivo artesanal e do seu funcionamento, pode-se pensar num *ribbon blender* como o apresentado na Figura 2-17 mas com um reservatório de geometria côncava. A Figura 3-9 apresenta o dispositivo artesanal referido anteriormente. O material segue depois para o reservatório que contém também a balança gravimétrica e a pá, como referido anteriormente em §3.2.1 e Figura 3-6.

Também no topo, existe uma tremonha de secção quadrada contendo as resinas plásticas e que faz a alimentação da balança gravimétrica que, posteriormente, alimenta o reservatório. O hopper de secção quadrada é apresentado na Figura 3-8.

A meio, encontra-se o conjunto, reservatório, balança e dispositivo desenvolvido internamente que tem como função alimentar a extrusora, após receber o material proveniente da balança e do dispositivo artesanal. A Figura 3-10 apresenta o conjunto reservatório, balança e dispositivo artesanal.





**Figura 3-8 – Carrinho e tremonha de secção quadrada**



**Figura 3-9 – Dispositivo artesanal**



Figura 3–10 – Alimentador da extrusora composto por recipiente, balança e dispositivo artesanal.

### 3.2.3 Transporte dos materiais

O transporte dos materiais a processar e do produto acabado é um processo extremamente simples e de rápida execução.

Numa primeira fase, é feito o *picking* no armazém, sendo transportado até à zona de mistura onde se encontra o misturador. Em seguida, já com o “*one-pack*” preparado, este é adicionado ao carrinho que é transportado até ao sistema de alimentação da extrusora. Ocorre o processo de produção, onde é criado o *big-bag* e, para o seu enchimento, é utilizado um sistema de vácuo. Este, ou é separado em sacos mais pequenos de 25 ou 30kg ou armazenado numa segunda zona do armazém, conforme a encomenda. Em seguida, são encaminhados para a zona de carga, finalizando a encomenda. O transporte é realizado por um operador com o auxílio de uma empilhadora.

O carrinho de transporte foi criado para facilitar o transporte da tremonha, que faz parte do sistema de alimentação. Assim, evita-se a necessidade de utilizar diferentes recipientes/sacos para a mistura, otimizando o tempo de transporte e descarga de material entre os vários recipientes. O carrinho de transporte e respectiva tremonha é apresentado na Figura 3–11.



**Figura 3-11 – Carrinho de transporte e tremonha**

#### **3.2.4 Mudança de ordem de produção e limpeza da linha**

A mudança de ordem e limpeza de linha de produção foram descritas anteriormente em §2.10, pelo que, aqui, será explicado o que ocorre na ISOLAGO.

A linha de produção em análise é a responsável pela produção dos Isocolors (concentrados de cor), isto é, confere cor às resinas plásticas, envolvendo vários pigmentos de várias cores distintas. Devido à intensa acção química, poeiras, aderência, humidade e gases provenientes da extrusora, os pigmentos tornam a tarefa de limpeza complexa, pois os componentes da linha de produção ficam com a cor que se está a produzir.

Como o processo produtivo é *make-to-order*, isto é, a produção é regulada conforme as encomendas recebidas, é impossível ter uma sequência pela qual é feita a produção e consequente troca de cor pois, como dito anteriormente, a sequência de cor tem influência no tempo de mudança de ordem. Mudar de Incolor para Preto é mais rápido que limpar a máquina de Preto para Incolor.

Assim, sempre que é necessário proceder a uma mudança de cor, é necessário parar a produção e efectuar a tarefa de limpeza de todos os componentes envolventes. A tarefa é realizada pelos mesmos dois operadores que controlam a mistura. Após informação recolhida junto dos mesmos, estes afirmam que demoram em média três horas, consoante o pigmento em causa a limpar, porque há uns que aderem mais aos componentes, sendo mais difíceis de remover. Da mesma fonte, surge a informação de que a limpeza é realizada manualmente, com a ajuda de água, detergentes e escovas ou esfregões. Deste tipo de limpeza, pode haver a formação também de poeiras, o que vai tornar o ambiente fabril uma fonte de contaminação. Para limpar o sem-fim e o cilindro, é utilizada resina plástica purgante.

### 3.3 Origem e explicação dos problemas a solucionar

Da explicação do processo produtivo em §3.2, conseguem-se identificar diversos problemas que são a razão para a existência desta dissertação.

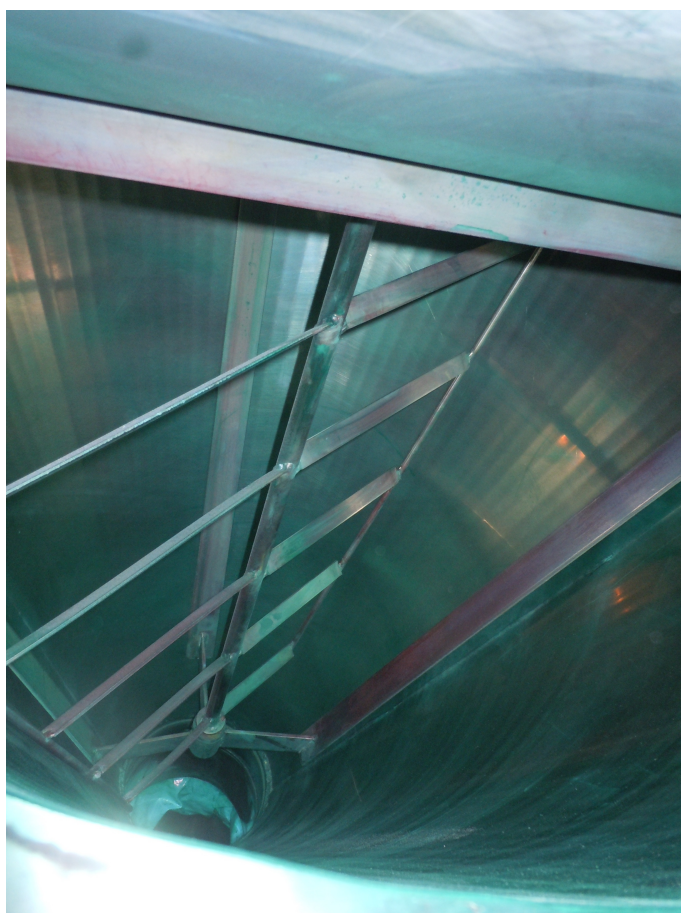
Da mistura e manuseamento, em §3.2.1, surgem os primeiros problemas a solucionar:

- O misturador encontra-se longe da extrusora, perdendo-se algum tempo no transporte da mistura;
- A pesagem dos diferentes ingredientes utilizados nem sempre são os correctos, originando defeitos na receita, sendo necessário um reprocessamento;
- Devido ao facto de apenas se manusear materiais em pó na zona do misturador, existe o problema de criação de poeiras no ambiente fabril, não só na zona do misturador como também em grande parte da fabrica para onde alastra, o que é prejudicial para a saúde dos operadores, mesmo que estes utilizem os adequados equipamentos de protecção. Deste modo, toda a fábrica se torna uma fonte de contaminação.

No processo de alimentação descrito em §3.2.2, os problemas identificados são:

- O elevado número de componentes do sistema de alimentação faz com que o tempo de limpeza seja longo e complexo;
- No carrinho foi incorporado um sistema no interior do *hopper*, constituído por lâminas que, por rotação, têm como finalidade, apenas quebrar o *bridging* e o *funnel flow*. Sabe-se que nem sempre é eficiente. Estas alterações podem ser observadas na Figura 3–12 onde pode ser visto o dispositivo incorporado;
- A mistura dos polímeros/resinas plásticas e do aditivos/ajudantes do processo é defeituosa porque não existe nada que faça uma mistura uniforme dos mesmos antes que estes entrem na extrusora. E isso causa variações de concentrações no produto. A mistura entre os dois acontece já no interior da extrusora.





**Figura 3-12 – Lâminas rotativas que foram incorporadas no *hopper* que está acoplado ao carrinho**

De §3.2.3, identificam-se os problemas já referidos, que são:

- O facto de o misturador estar longe da extrusora, sendo necessário um operador auxiliado por uma empilhadora a fazer o transporte da mistura, não havendo um sistema de tapetes, vácuo ou carris que o faça de forma mais rápida.

De §3.2.4, que diz respeito à mudança de ordem e limpeza, os problemas identificados são:

- Como referido anteriormente, o elevado número de componentes que constituem o sistema de alimentação;
- Também referido anteriormente, não existe um sistema semi-automático ou automático de limpeza, tendo esta que ser efectuada manualmente, causando elevados tempos de não produção;



## 4 SOLUÇÕES E PROPOSTAS

### 4.1 Introdução

Neste capítulo, serão exibidas as novas soluções e pontos de optimização, com vista a obter melhorias nos processos e aumento da qualidade dos produtos produzidos.

No capítulo anterior, foi descrito todo o processo de produção da empresa ISOLAGO, e identificados e enumerados os diversos problemas que se enquadram com o tema e estudo desta dissertação.

Tem-se, como objectivo, solucionar o maior número dos problemas encontrados, directa ou indirectamente. Perceba-se por resolução indirecta, o facto de se solucionar um problema através de algo que não lhe está directamente relacionado. Dá-se como por exemplo, a criação de um dispositivo automático que limpa o carrinho. Assim, diminui-se o tempo de mudança de ordem e a ocorrência de contaminações e poeiras no ambiente fabril.

### 4.2 Propostas com vista a melhoramentos na mistura e alimentação.

Várias são as soluções viáveis que se podem apresentar mas, devido a factores económicos ou funcionais, algumas soluções são logo excluídas. As soluções em baixo apresentadas tiveram em conta ambos os factores citados.

#### 4.2.1 Dimensionamento de nova tremonha

A concepção de uma nova tremonha é uma solução bastante interessante, daí ser uma das soluções que em seguida será apresentada.

Para um melhor dimensionamento das tremonhas, é necessário ter consciências dos problemas que a estas estão associados. Tais problemas foram abordados em §2.3.2 e verificados aquando da visita à unidade fabril. Desta abordagem, conclui-se que existem dois tipos de problemas, ou o material não escoar adequadamente (coesão, *bridging* e *funnel flow*) ou o material segrega durante o escoamento. Estes problemas estão relatados em §3.3.

Como verificado, o carrinho é uma fonte de obstáculos tanto para a alimentação como para a mistura. Verificou-se também que o escoamento nem sempre é o mais eficiente. Das dimensões fornecidas, sabe-se que o ângulo do cone da tremonha é de aproximadamente  $36^\circ$ . O ângulo do cone da tremonha é identificado na Figura 4–1 como  $\theta_c$ .

Como não foi possível obter nem determinar o valor do *wall friction angle*,  $\phi_w$ , e sabendo que a tremonha do carrinho apresenta escoamento incerto, ou seja, nem sempre tem escoamento uniforme, resulta o estudo, análise e interpolação gráfica da Figura 4–1 onde se consegue estimar um valor para  $\phi_w$  uma vez que  $\theta_c=36^\circ$ . Assim, traçando uma linha vertical

em  $\theta_c=36^\circ$  até à região de incerteza (*uncertain region*), obtém-se um valor máximo e mínimo para  $\phi_w$  conforme os limites da região. Do limite superior da região, traça-se uma linha horizontal no sentido para o qual o  $\theta_c$  tende para zero, até ao limite esquerdo da região de incerteza. Cruzando a linha com uma nova linha vertical no sentido descendente, até intersectar o eixo de  $\theta_c$ , obtém-se um novo valor para  $\theta_c$ , que toma valores próximos dos  $29^\circ$ . Este novo valor é o máximo que a nova tremonha do carrinho pode ter, de forma a garantir que o escoamento deixe de ser incerto. Este estudo só é possível ser realizado, porque a fórmula/receita e os materiais utilizados e processados são sempre os mesmos. Qualquer variação na receita e materiais, pode originar uma alteração no valor de  $\phi_w$ , deitando por terra este estudo. Para esta explicação foi utilizado o gráfico da Figura 4–1 como fundamento e justificação para o dimensionamento da nova tremonha para o carrinho.

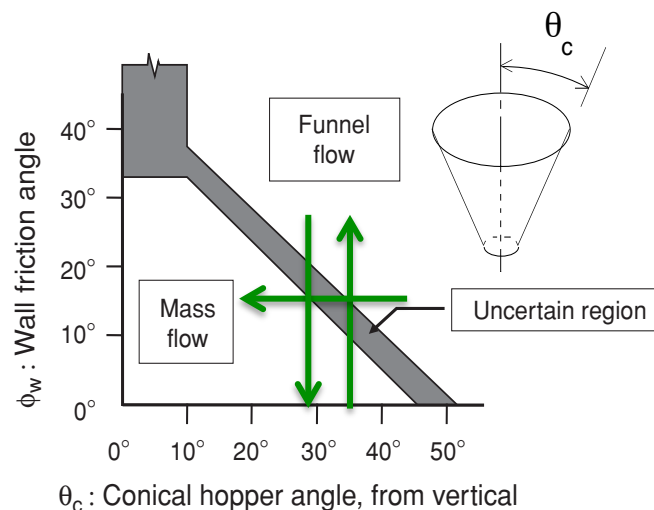


Figura 4–1 – Gráfico para dimensionamento de *hoppers* cónicos e respectivas regiões do tipo de escoamento (com base no estudo efectuado por Jenike [25]) (Adaptado [32])

#### 4.2.2 Transformação em *ribbon blender* vertical

Como mencionado anteriormente, a tremonha do carrinho é uma das fontes dos problemas encontrados na unidade fabril. Outra fonte é o facto de não haver um recipiente ou dispositivo que faça a mistura dos grãos com o pó. Surge assim a hipótese de se transformar a tremonha do carrinho em *ribbon blender* vertical. O seu princípio de funcionamento e vantagens foram introduzidos anteriormente em §2.6.

Para que a transformação/adaptação seja possível, é necessário proceder ao estudo e dimensionamento de um sem-fim e respectivos componentes acoplados. Da informação recolhida em empresas especializadas, existem poucas regras a ter em conta mas que são determinantes para o bom funcionamento e eficiência.

É necessário projectar a transformação/adaptação e a construção de vários componentes, desde uma tampa amovível, à qual estão acoplados o motor e o sem-fim até aos elementos necessários para que o sem-fim tenha o movimento de rotação em torno do seu

próprio eixo e rotação em torno do eixo da tremonha. A tampa terá de ter uns olhais para que se torne de fácil remoção, transporte e limpeza do conjunto.

O sem-fim terá de ter um diâmetro total (veio mais rosca) igual ao diâmetro de saída da tremonha. A rosca terá de ser helicoidal de forma a realizar o processo de transporte e mistura dos materiais, como descrito em §2.6

A Figura 4-2 apresenta o desenho de como pode ficar a transformação descrita. A Figura 4-3 apresenta o desenho da tampa.

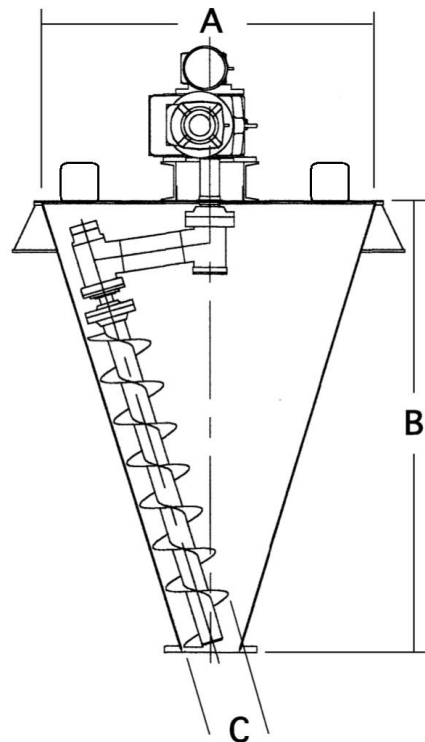


Figura 4-2 – Configuração de como ficará transformação.

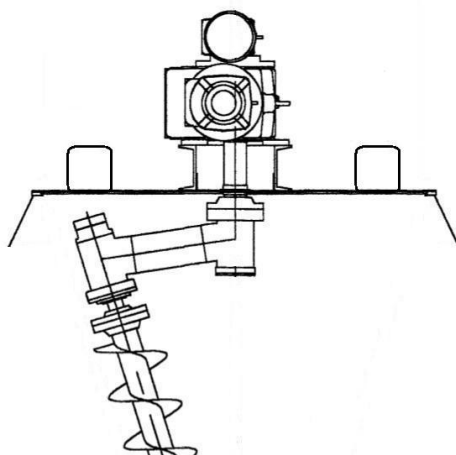


Figura 4-3 – Tampa com sem-fim, motor e olhais.

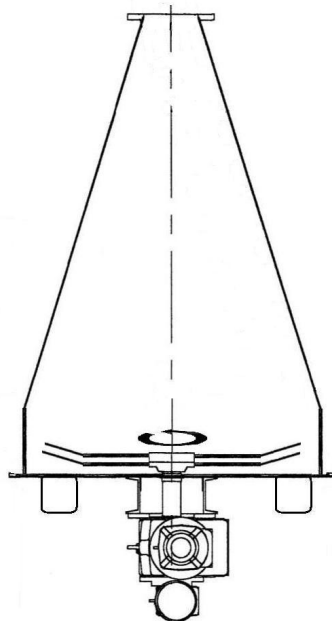
#### 4.2.3 Transformação em misturador/alimentador

Uma das formas de aproximar o misturador à extrusora, sem ser o reposicionar do misturador, é acrescentar um equipamento que tenha o mesmo princípio de funcionamento de

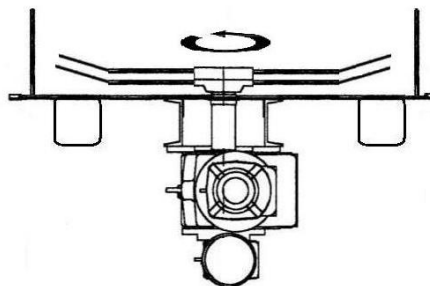
um misturador. Assim, chega-se à presente solução, que consiste em adicionar ao topo da tremonha do carrinho uma caixa amovível com lâminas ,cujo objectivo é proceder à mistura dos diferentes ingredientes, através da rotação. Para que o processo de mistura ocorra, será necessário primeiramente adicionar os ingredientes a misturar, adicionar a caixa e, finalmente, rodar o carrinho  $180^\circ$ . Após o processo, voltar a rodar o carrinho  $180^\circ$  e proceder à descarga do mesmo para o sistema de alimentação da extrusora ou directamente para a mesma.

Esta opção é mais apropriada para realizar a mistura de pós, contudo, pode também conter grãos, conforme a configuração e a velocidade de rotação das lâminas. Também com esta opção, o tempo de preparação da mistura até chegar à extrusora é reduzido, uma vez que é eliminado o processo de mistura do misturador, como mencionado anteriormente. Ter-se-á de fazer pequenas alterações no carrinho, de forma a facilitar a rotação do mesmo.

A Figura 4-4 apresenta a configuração final de como ficará a transformação em misturador/alimentador. A Figura 4-5 apresenta a caixa de mistura e respectivas lâminas.



**Figura 4-4 – Transformação em misturador/alimentador.**



**Figura 4-5 – Caixa com as lâminas de mistura.**

### 4.3 Proposta de novos sistemas de mistura e alimentação da extrusora

Como descrito anteriormente, o processo de mistura apresenta várias falhas e carece de melhoramentos. Assim, em vez de se adoptar por uma via onde apenas se fazem pequenas modificações ou adaptações a determinados componentes/equipamentos, opta-se por reformular/redesenhar o sistema actual de alimentação da extrusora.

Nos novos sistema de alimentação, ir-se-á incorporar uma das propostas anteriores, a transformação em *ribbon blender* vertical (ver §4.2.2) ou a transformação em misturador/alimentador (ver §4.2.3). Para um melhor entendimento da disposição e processos que as propostas dos novos sistemas terão, serão apresentados diagramas semelhantes aos apresentados em §2.4.

Irão ser propostas duas disposições para o novo sistema de alimentação. A primeira, em que é utilizado o *ribbon blender* vertical ou o misturador transformado que é alimentado manualmente por operadores. Fará a mistura entre os diferentes ingredientes e materiais do processo e simultaneamente a alimentação para a extrusora. Como há mistura de pó com grão, deixa de haver a probabilidade de ocorrência de instabilidades, como, por exemplo, *bridging*, *funnel flow*, entre outros, problemas mais prováveis quando se trata só de pó. A Figura 4–6 apresenta o fluxo de operação da primeira proposta para o novo sistema de alimentação.

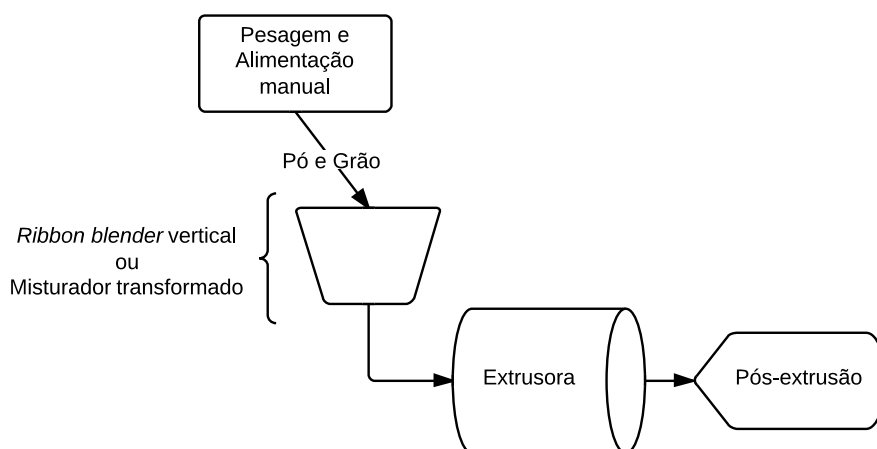
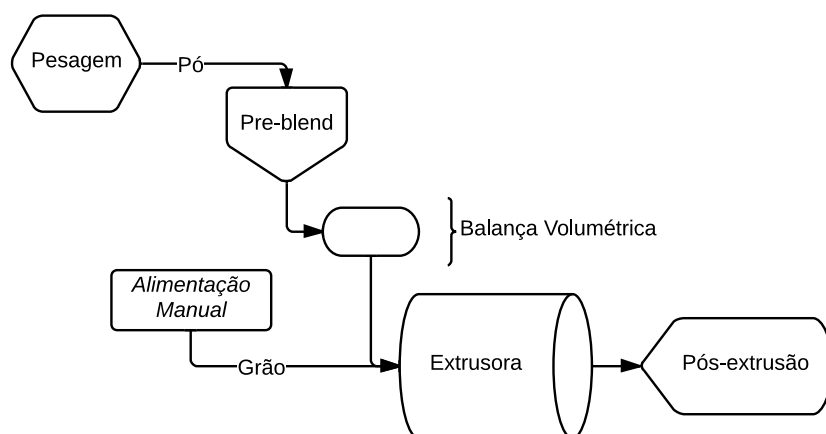


Figura 4–6 – Diagrama de fluxo de operações para novo sistema de operações. Proposta 1.

Na segunda, é utilizado o *ribbon blender* vertical onde é efectuada a pesagem e pré mistura dos ingredientes em pó (*pre-blend*). Da mistura, determina-se a sua densidade e calcula-se a quantidade correspondente de pó a adicionar, conforme a fórmula/receita a ser produzida. A extrusora é então alimentada, ocorrendo a mistura entre os vários ingredientes no cilindro. A Figura 4–7 apresenta o fluxo de operação da segunda proposta para o novo sistema de alimentação.



**Figura 4-7 – Diagrama de fluxo de operações para novo sistema de alimentação. Proposta 2.**

Também foi pensado um sistema em que o *ribbon* era alimentado por balanças gravimétricas, contudo, devido aos vários ingredientes, seria necessário investir em várias balanças, o que dá a esta opção um elevado custo inicial.

#### **4.4 Novo Sistema de Limpeza**

Devido à inexistência de sistemas de limpeza semi-automáticos e/ou automáticos e com vista a diminuir os tempos de mudança de ordem e limpeza, bem como do ambiente fabril, três novas soluções são apresentadas.

A criação de uma câmara de isolamento para a mistura serve também de proposta e é uma necessidade, uma vez que a mistura de pós prejudica o ambiente fabril, devido à criação de poeiras. Assim toda a poeira proveniente da mistura fica num local isolado, evitando também contaminações, melhorando o ambiente dos operadores e facilitando a operação de limpeza.

Uma segunda câmara de isolamento pode também ser criada, mas com a finalidade de isolar os equipamentos e materiais a limpar. Durante a limpeza, também há criação de poeiras e a utilização de água, molha o chão e pode criar humidade no ambiente da unidade produtiva, podendo afectar equipamentos eléctricos e aumentar o tempo de limpeza da unidade.

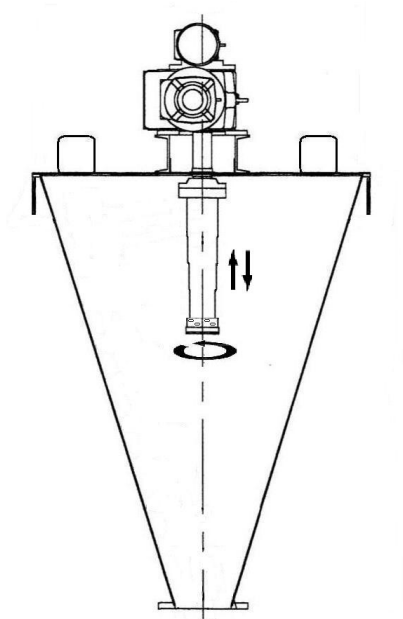
São agora apresentados diferentes propostas para sistemas de limpeza de tremonhas. Todas têm sistema de rotação e utilizam água e detergente de forma a eliminar qualquer vestígio da anterior produção. Com estas propostas, o objectivo é diminuir o tempo não produtivo de limpeza.

##### **4.4.1 Aspersor extensível**

Sistema constituído por uma tampa que contém um aspersor rotativo, de onde é expelida água com elevada pressão, acoplado a um braço extensível que desce ao longo da



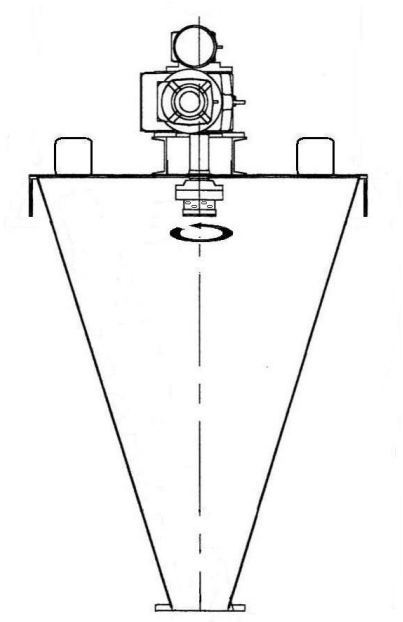
altura da tremonha até que sai pela orifício de descarga. O braço extensível tem como objectivo levar a pressão de água a toda a superfície interna da tremonha. A Figura 4-8 apresenta a configuração do aspersor extensível.



**Figura 4-8 Aspersor extensível.**

#### **4.4.2 Aspersor fixo rotativo**

Sistema constituído por uma tampa com aspersor fixo rotativo, de onde é expelida água com elevada pressão e que faz com que a água desça ao longo da superfície interior da tremonha até sair pelo orifício de descarga. A Figura 4-9 apresenta a configuração do aspersor fixo rotativo.



**Figura 4-9 Aspersor fixo rotativo.**

#### 4.4.3 Escovilhão/Escova

São apresentadas duas propostas para o sistema de escovilhão/escova. Ambos têm rotação e os filamentos do escovilhão/escova esfregam a superfície interna da tremonha e, auxiliados por água e detergente, limpam e eliminam os vestígios de produtos da produção anterior. Os filamentos têm de ser suficientemente abrasivos mas sem danificar e riscar a superfície interior da tremonha. Com este sistema, aumenta-se a eficiência e qualidade de limpeza enquanto se diminui o tempo de limpeza e não produção.

A Figura 4–10 apresenta as configurações onde em a) o escovilhão e em b) a escova.

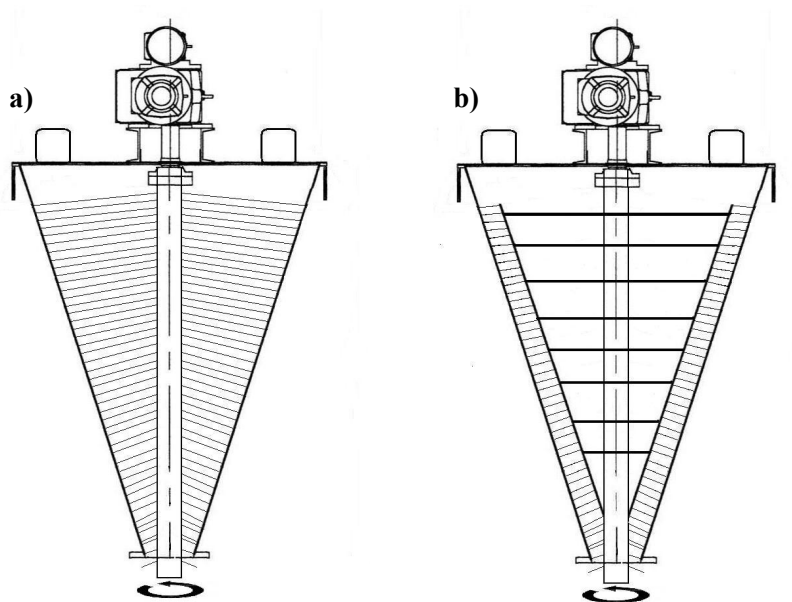


Figura 4–10 – Em a) Escovilhão e b) Escova

## **5 CONCLUSÕES**

### **5.1 Introdução**

No presente capítulo evidenciam-se as conclusões relativas ao trabalho concretizado e destacam-se propostas para desenvolvimentos futuros.

Em cada capítulo relatado na presente dissertação, os aspectos mais significativos e conclusões a evidenciar foram sintetizados no final do mesmo, pelo que as conclusões apresentadas no presente capítulo são as que se consideram de carácter mais abrangente. É no entanto de salientar que as conclusões cruciais retiradas do presente trabalho, neste caso, propostas de melhoria e soluções possíveis, foram apontadas no capítulo anterior.

No que diz respeito a desenvolvimentos futuros, acredita-se que estes passem pelo projecto de dispositivos que realizem o transporte das matérias primas e a aquisição de uma nova extrusora.

### **5.2 Conclusões**

Conclui-se que a melhor ferramenta de medição de material é a pesagem em vez da volumétrica, pois nem todos os grãos têm a mesma massa, densidade e volume, originando erros e ao mesmo tempo alterando a mistura final.

A proposta mais vantajosa a ser aplicada, caso se altere o sistema de alimentação, é a proposta 1, pois apenas será necessário proceder à adaptação/transformação da tremonha, não sendo previsto um custo elevado, uma vez que se vai reutilizar equipamentos existentes.

A proposta mais vantajosa a ser aplicada para o sistema de limpeza é a opção do escovilhão, pois é o que executa com maior eficácia o processo de limpeza e remoção de materiais da produção anterior.

Por fim, considerar a aplicação das câmaras de isolamento tanto para a mistura como para a limpeza, uma vez que estes melhoram significativamente o ambiente fabril, diminuem o tempo de mudança de ordem e evitam contaminações entre produções.

### **5.3 Propostas para desenvolvimentos futuros**

Como sugestão para uma perspectiva de trabalho futuro, seria interessante efectuar um estudo mais aprofundado, no qual seja possível contemplar o manuseamento das matérias primas, desde que estas chegam do fornecedor até que são utilizadas no processo de produção, bem como da sua gestão logística. Contudo, seria necessário introduzir na fábrica equipamentos que realizassem esse manuseamento, para o que seria necessário ter disponível um operador.

Para melhor entendimento do comportamento e escoamento dos materiais dever-se-á, proceder ao estudo do escoamento bidimensional de partículas sólidas na tremonha bem como aplicar o estudo de *Janike*. Far-se-á também o estudo de pressões e a utilização o método de elementos discreto (DEM)

Um aspecto interessante a considerar, será o estudo de uma nova extrusora, pois a que se encontra disponível, já tem diversas folgas no sem-fim. Também o sem-fim não tem comprimento suficiente para realizar o processo de mistura completo. Acrescenta-se ainda o facto de o sistema de arrefecimento da extrusora não funcionar.

Entre muitos, estes tópicos seriam de extrema vantagem porque fariam com que o tempo de ciclo fosse menor, havendo uma maior eficiência da linha.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Michaeli, Greif, Wolters, and Vossebürger, *Training in Plastics Technology*, 2nd ed. Hanser, 2000.
- [2] A. W. Birley and M. J. Scott, *Plastics Materials: Properties and Applications*. Leonard Hill, 1982.
- [3] A. B. Strong, *Plastics: materials and processing*. Pearson Prentice Hall, 2006.
- [4] F. Hensen and U. Berghaus, *Plastics Extrusion Technology*. Hanser Gardner Publications, 1997.
- [5] Y. Fang, M. Zhan, and Y. Wang, “The status of recycling of waste rubber,” *Materials & Design*, vol. 22, no. 2, pp. 123–128, Apr. 2001.
- [6] E. A. Muccio, *Plastics Processing Technology*. ASM Internacional, 1994.
- [7] C. Rauwendaal, *Polymer Extrusion*, 4th ed. Hanser, 2001.
- [8] C. Rauwendaal, *Polymer Mixing: A Self Study Guide*. Hanser Gardner Publications, 1998.
- [9] C. I. Chung, *Extrusion of Polymers: Theory and Practice*. Hanser Gardner Publications, 2000.
- [10] D. B. Todd, *Plastics Compounding: Equipment and Processing*. Hanser/Gardner Publications, 1998.
- [11] T. A. Osswald and J. P. Hernández-Ortiz, *Polymer Processing: Modeling and Simulation*. Hanser-Gardner Publications, 2006.
- [12] H. F. Giles, *Extrusion : The Definitive Processing Guide*. .
- [13] Z. Tadmor and C. G. Gogos, *Principles of Polymer Processing*, 2nd ed. Wiley.
- [14] J. Lee, S. C. Cowin, and J. S. T. III, “An Experimental Study of the Kinematics of Flow Through Hoppers,” *Transactions of the Society of Rheology*, vol. 18, no. 2, pp. 247–269, 1974.

- [15] H. A. Janssen, "Versuche über Getreidedruck in Silozellen," *Zeitschr. d. Vereines deutscher Ingenieure*, vol. 39, no. 35, pp. 1045–1049, 1895.
- [16] D. M. Walker, "An approximate theory for pressures and arching in hoppers," *Chemical Engineering Science*, vol. 21, no. 11, pp. 975–997, 1966.
- [17] J. K. Walters and R. M. Nedderman, "A note on the stress distribution at great depth in a silo," *Chemical Engineering Science*, vol. 28, no. 10, pp. 1907–1908, 1973.
- [18] S. S. Grossel, R. G. Zalosh, and A. I. of Chemical Engineers. Center for Chemical Process Safety, *Guidelines for safe handling of powders and bulk solids*. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 2004.
- [19] "Vrieco-Nauta® mixer - Hosokawa Micron B.V. | The Netherlands." [Online]. Available: <http://www.hosokawamicron.nl/technologies/mixing-equipment/batch-mixing-technologies/vrieco-nauta-conical-screw-mixer.html>. [Accessed: 31-May-2013].
- [20] "Fluid Bed Granulation, Drying, and Coating." [Online]. Available: [http://www.niroinc.com/pharma\\_systems/fluid\\_bed\\_drying.asp](http://www.niroinc.com/pharma_systems/fluid_bed_drying.asp). [Accessed: 01-Jun-2013].
- [21] "TBMA - Gravimetric dosing feeders." [Online]. Available: <http://www.tbma.com/en/products/dosing-feeders/gravimetric-dosing-feeders/>. [Accessed: 02-Jun-2013].
- [22] "Gravimetric Extrusion Control." [Online]. Available: [http://www.ktron.com/industries\\_served/Plastics/Gravimetric\\_Extrusion\\_Control.cfm](http://www.ktron.com/industries_served/Plastics/Gravimetric_Extrusion_Control.cfm). [Accessed: 29-May-2013].
- [23] "TBMA - Volumetric dosing feeders." [Online]. Available: <http://www.tbma.com/en/products/dosing-feeders/volumetric-dosing-feeders/>. [Accessed: 02-Jun-2013].
- [24] "Volumetric Feeders | MERRICK Industries, Inc." [Online]. Available: [http://merrick-inc.com/volumetric\\_feeders](http://merrick-inc.com/volumetric_feeders). [Accessed: 01-Jun-2013].
- [25] A. W. Jenike, *Storage and Flow of Solids*. Bull. No. 123, 20th Printing, Revised 1980. Engng. Exp. Station, University of Utah, Salt Lake City, 1964.

- [26] “Understanding Particulate Solids.” [Online]. Available: <http://www.nauticom.net/www/jhorst/paper1.htm>. [Accessed: 18-May-2013].
- [27] D. Schulze, *Powders and Bulk Solids: Behavior, Characterization, Storage and Flow*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [28] George G. Chase, *Solids Notes*. The University of Akron, 2004.
- [29] B. Guedes and M. E. Filkauskas, *O Plastico*. Érica, 1986.
- [30] C. A. Harper, *Modern Plastics Handbook*. McGraw-Hill, 1999.
- [31] N. P. Cheremisinoff, *Advanced Polymer Processing Operations*. Elsevier Science, 1998.
- [32] D. McGlinchey, *Bulk solids handling: equipment selection and operation*. Blackwell Pub., 2008.
- [33] H. Purutyan, B. H. Pittenger, and C. W., “Solve solids handling problems by retrofitting,” *Chemical Engineering Progress*, vol. 94, no. 978, pp. 27–40, 2001.